



Luftföroreningar, klimat och framtid

50 års forskning vid Gårdsjön
Gårdsjöstiftelsen

Denna bok bör citeras: Gårdsjöstiftelsen 2023. *Luftföreningar, klimat och framtid. 50 års forskning vid Gårdsjön.* – Gårdsjöstiftelsen, Stenungsund.

Enskilda avsnitt bör citeras enligt exempel: Pleijel, H., Jutterström, S., Lagergren, R. & F. Moldan. 2023. Att övervaka miljön. I: Gårdsjöstiftelsen 2023. *Luftföreningar, klimat och framtid. 50 års forskning vid Gårdsjön.* – Gårdsjöstiftelsen, Stenungsund.

Avsnitt: *Välkomna till Gårdsjön och Gårdsjönaturen.* Svante Hultengren Naturcentrum AB.

Sjöarna i Svartedalsområdet. Ragnar Lagergren Länsstyrelsen i Västra Götaland.

Kväve i skogen. Sara Jutterström och Filip Moldan båda IVL Svenska Miljöinstitutet AB.

Att övervaka miljön. Håkan Pleijel Göteborgs universitet, Sara Jutterström IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Ragnar Lagergren Länsstyrelsen i Västra Götaland och Filip Moldan IVL Svenska Miljöinstitutet AB.

Luftföreningar och försurning – 50 år av gränsoverskridande luftvårdspolitik. Christer Ågren.

Klimat, luftföreningar och landskap. Håkan Pleijel Göteborgs universitet.

Problemet med kvicksilver i Sverige och Gårdsjön. Hans Hultberg, Sara Jutterström och John Munthe samtliga IVL Svenska Miljöinstitutet AB.

Teknisk redaktion, layout och produktion: Svante Hultengren.

Omslagsfoto: Södra delen av Gårdsjön 31/8 2023, Svante Hultengren.

Fotografier: Claes Andrén (hasselsnok sid.15), Sven Birkedal (grönvit nattviol sid. 15), Istock/www.istockphoto.com (sid 41), Jenny Klingberg (sid. 30), Thomas Liebig (myrlilja och knärot sid. 10), Ragnar Lagergren (Torrgårdsvattnet och Härsvatten sid. 18 och 20), Filip Moldan (sid. 27, 51), Håkan Pleijel (sid. 29, 30, 33 tobaksblad, 34 lunglav, 37, 48 granskog), Henrik Weibull (stor kvastmossa, stor björnmossa och sotvitmossa sid.16) och Christer Ågren (sid. 40). Övriga fotografier Svante Hultengren/Naturcentrum AB.

Illustrationer: Klaus Albrechtsen (sid 37), Nils Forshed (sid. 11, 48), Svante Hultengren (tofsmygglarv och buksimmare sid. 19) och Therese Johannesson (abborre sid. 19).

Karta: Metria, Ortofoto.

Tryckningsinformation: 3 000 exemplar, Elanders Sverige AB.

Boken kan beställas från: Gårdsjöstiftelsen, c/o Naturcentrum AB, Västanvindsgatan 8, 444 30 Stenungsund, e-mail: ncab@naturcentrum.se

ISBN 978-91-85221-46-2

Boken har tryckts med ekonomiskt stöd från Lokala Naturvårdssatsningen LONA och Naturcentrum AB.

© Gårdsjöstiftelsen 2023

Luftföroreningar, klimat och framtid

Luftföroreningar, klimat och framtid

50 års forskning vid Gårdsjön

– Gårdsjöstiftelsen –



NATURCENTRUM AB



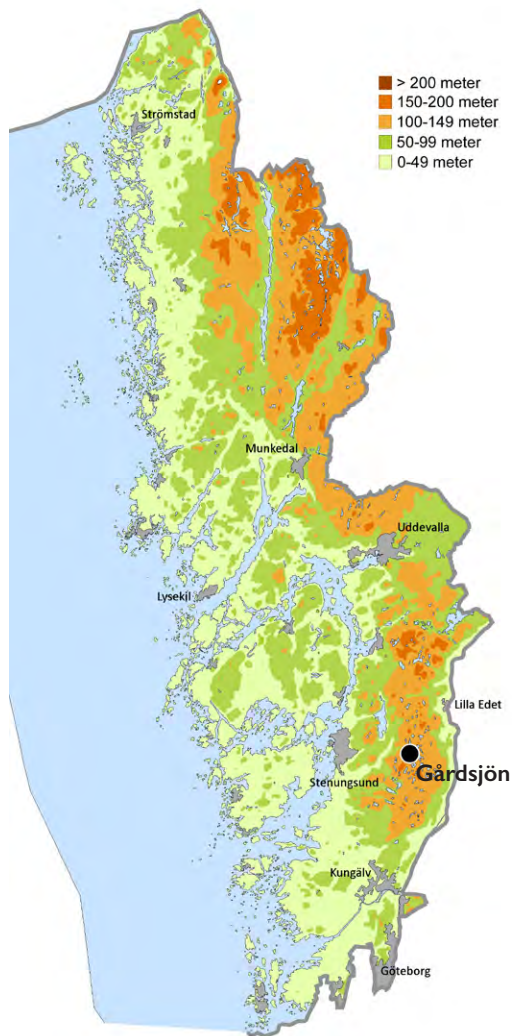
Innehållsförteckning



Välkomna till Gårdsjön.....	6
Gårdsjönaturen	7
Sjöarna i Svartedalsområdet.....	17
Kväve i skogen	23
Att övervaka miljön	29
Luftföroreningar och förurning – 50 år av gränsöverskridande luftvårdspolitik.....	37
Klimat, luftföroreningar och landskap... ..	45
Problemet med kvicksilver i Sverige och i Gårdsjön	51
Litteratur och hemsidor	54



Välkomna till Gårdsjön



Gårdsjön ligger ca 5 mil norr om Göteborg. Kör E6 norrut, ta av mot Ucklum vid Stora Höga. Kör ytterligare 9 km norrut till Ucklum. Tag av mot Västerlanda i Ucklum. Efter ca 4 km avfart till höger mot Gårdsjön. Välkomna!

Gårdsjön är en ca 32 ha stor klarvattensjö, belägen i de näringsfattiga moränmarkerna ca en mil öster om Stenungsund i landskapet Bohuslän. Sjön ingår i Anråsåns vattensystem som mynnar i havet vid Anrås i Stora Höga. Det omgivande skogsområdet kallas Svartedalen och sträcker sig några mil åt söder. Berggrunden i Gårdsjöområdet består av svårvittrad gnejs och granit och jordarterna domineras av moräner. På 1960-talet drabbades sjöar och vattendrag i sydvästra Sverige av en omfattande fiskdöd. Stora mängder försurad nederbörd och marker med svag motståndskraft mot försurning gjorde att sjöarna i Svartedalen drabbades särskilt hårt.

Forskningen kring Gårdsjön

Under 50 år har forskning om luftföroreningar och deras effekter på vatten, växt- och djurliv bedrivits i och kring Gårdsjön. Resultatet har blivit en rik skörd av vetenskapliga skrifter och viktiga böcker om försurning och annan miljöpåverkan. Många av resultaten från forskningen är banbrytande och har bidragit till att klarlägga sambanden mellan surt regn och effekter på vatten, mark och ekosystem. Resultaten har utgjort underlag för att politiker, från lokal till EU-nivå, har kunnat fatta beslut om hur försurning och andra luftvårdsproblem har kunnat motverkas.

Naturstig och informationskrift

Med syftet att berätta om Gårdsjöns olika forskningsprojekt och natur invigdes år 2000 en naturstig. Den har under åren varit mycket populär och välbesökt, och under 2023 gjordes en uppgradering av stig, spärrar och skyltning. Naturstigen börjar mellan parkeringsplatsen och sjön och bjuder på en ca 5 km lång och omväxlande vandring runt hela sjön (se karta på sidan 8).

2007 tog Gårdsjöstiftelsen fram en skrift om Gårdsjön som bland annat behandlade resultaten från 35 års forskning kring sjön. Skriften innehöll också utblickar mot övriga Sverige, Europa och Världen. Nu kan ytterligare 15 år läggas till berättelsen om miljön och den långa forskningsinsatsen. Skriften "Luftföroreningar, klimat och framtid" håller du just nu i din hand.



Gårdsjönaturen

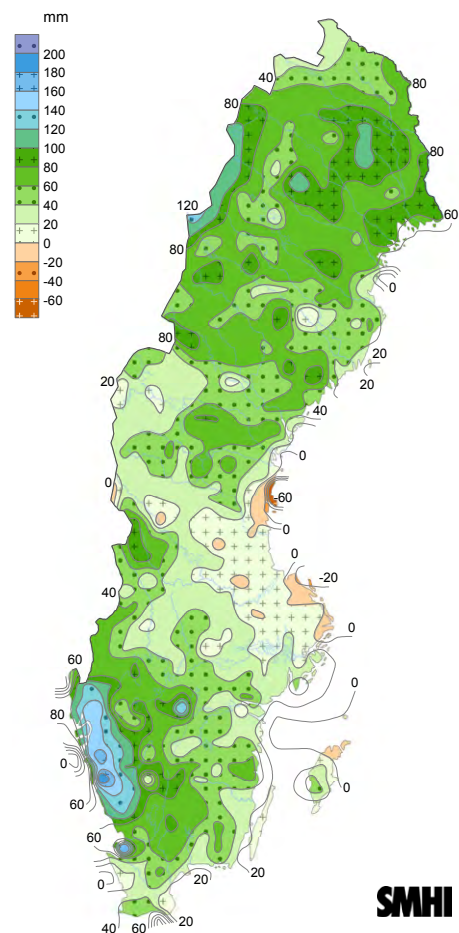


Klimatet

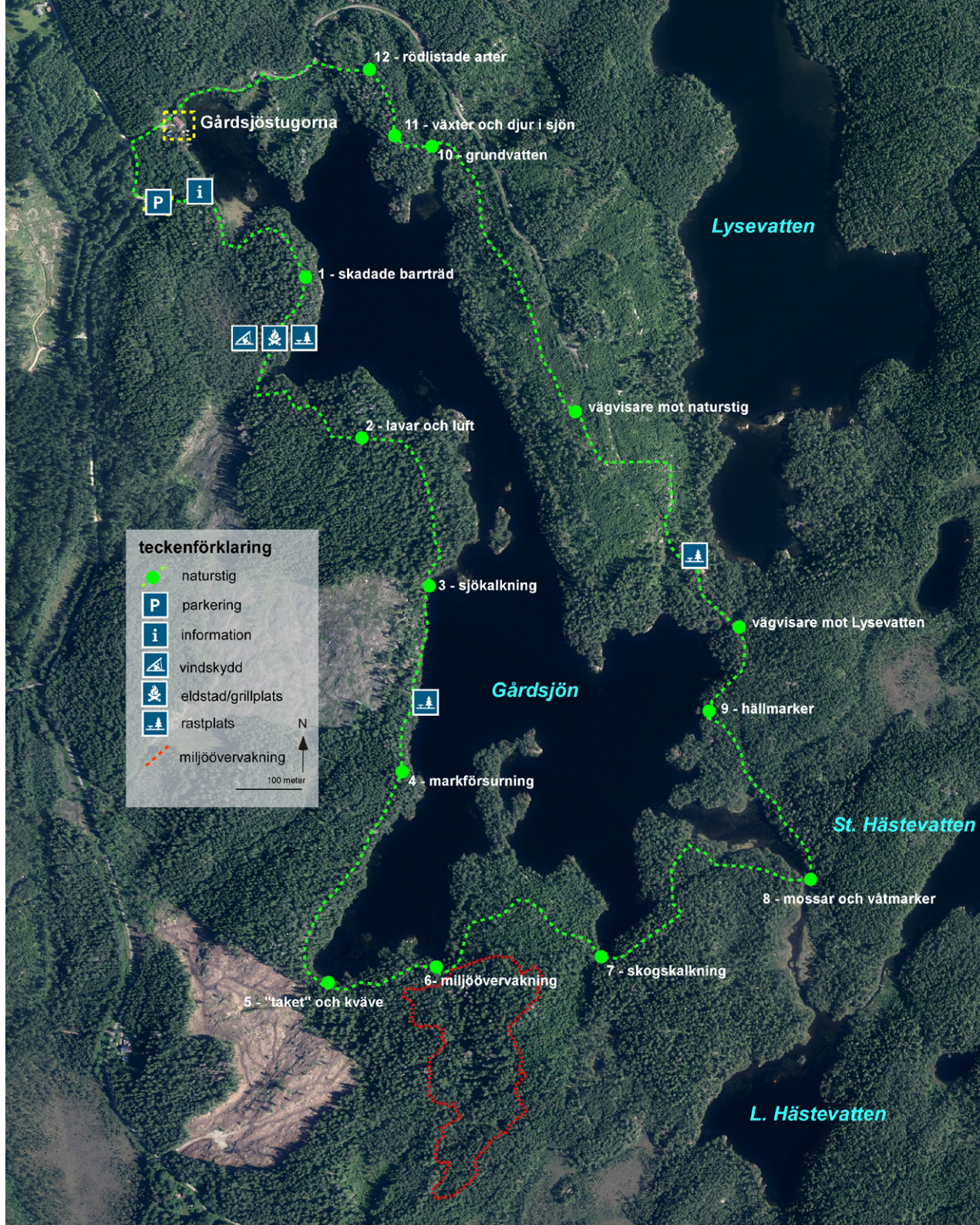
Inget svenskt landskap är så förknippat med det "riktiga" salta havet som Bohuslän, och närheten till havet har en utjämnande effekt på klimatet, främst temperaturen. I de höglänta östra delarna av landskapet är medeltemperaturen i februari (som är den kallaste månaden) strax under -1° , medan den i havsbandet är närmare en $+1^{\circ}$. I juli är medeltemperaturen cirka 17° i hela landskapet. Värdena gäller för perioden 1991–2000.

Årsnederbörden varierar från omkring 600 mm på de yttersta öarna i havsbandet till över 1000 mm i de inre delarna av Bohuslän. I Gårdsjön, som är en av de nederbördsrikaste delarna av Bohuslän, upp mot 1200 mm/år. Att det regnar mer beror på att fuktiga luftmassor från havet pressas upp över bergen, vilket i sin tur leder till att fukten i luften kyls av, kondenseras och faller ut som regn. Detta fenomen kallas orografisk nederbörd efter grekiskans "oros" som betyder berg. Landskapet Bohuslän har, liksom hela Sverige, blivit varmare under de senaste åren. Nederbörds­mängderna har också ökat, särskilt tydligt märks detta i området som omfattar norra Halland till Bohusläns inland.

Eftermiddagsmolnen tornar upp sig över Gårdsjön.



Det har skett en stor ökning av nederbörds­mängderna i nästan hela landet. Allra störst har ökningen varit på den svenska västkusten. Kartan visar skillnader i nederbörd (mm/år) mellan perioderna 1961–1990 och 1991–2020.



Hällmarker – näringsfattiga men artrika

Gårdsjön omges av olika typer av skogsnatur, men skogar på tunt jordtäckte och hällmarker dominerar. Vid en hastig anblick förefaller dessa, med sina glest stående tallar, sitt tunna jordtäckte glest stående ljungtuvor, vara synnerligen magra och artfattiga. Det är till och med så att man förundras över hur stora träd överhuvud taget kan växa på sådan mark. Men trots det karga intrycket finns det faktiskt en hel del organismer som lever här.

Titta lite närmare

Allra magrast är de nakna berghällarna, men nakenheten är en illusion. I själva verket täcks hällytorna av en mosaik av olika skorp- och bladlavor. Det finns hundratals lavar som lever på näringsfattiga bergytor. Lavarna täcker i stort sett 100 % av bergytorna och de bidrar i viss mån till att vittra sönder och bryta ner berget.

En lav är en "multiorganism" som består av flera olika livsformer, en eller flera svampar, alger och bakterier. De kan egentligen mer liknas vid små ekosystem snarare än enskilda arter. Svampdelen dominerar och det är den du ser, men inne i laven finns alger som producerar kolhydrater med hjälp av fotosyntesen. Dessa tar svampen del av, och i gengäld får algen skydd inne i svampbålen. Detta gör att lavarna är ganska tåliga och kan växa på platser där inga andra organismer kan leva, till exempel på berghällarna kring Gårdsjön. På berghällarna växer de i stort sett utan konkurrens från andra växter. De flesta lavar växer extremt långsamt. En renlav växer till exempel bara en halv centimeter om året och behöver endast små mängder näring och vatten, en kartlav bara någon tiondels millimeter per år.

Att det saknas lövskog och att örtfloran är artfattig beror på att marken är näringsfattig och att det tunna jordtäckte lätt torkar ut. Men ljun, enstaka mosstuvor, bergglim, kruståtel och fårsvingel kan man hitta på hällmarkerna. Här och var, där det finns vatten, kan tallplantor gro och växa upp till ett glest trädskikt.

Mer jord – fler växter

Där det samlats lite vittringsjord, gärna i fuktiga svackor, kan fler gröna växter etablera sig. I den täta och skuggiga granskogen är det stor kvastmossa, husmossa, väggmossa och skogsvitmossa som dominerar. Här och var växer också ljust mattgröna och täta tuvor av falsk vitmossa. På sidan 16 presenteras ett antal vanliga mossarter från Gårdsjöns omgivning. Där mossorna börjar täcka stora ytor är jordskiktet ofta lite tjockare och i små gläntor i skogen etablerar sig blåståtel, blåbär och lingon.





Klockljung *Erica tetralix* (ovan), myrllilja *Narthe-cium ossifragum* (nedan) och knärot *Goodyera repens* (nederst).



Myrar, mossar och kärr

Den rikliga nederbörden i kombination med det uttalade sprickdalslandskapet gör att Gårdsjö- och Svartedalsområdet är rikt på små långsträckta sjöar, bäckar och våtmarker.

På botten av sjöar avlagras allehanda lämningar av växter, djur, jord och sten. Allt eftersom tiden går fylls sjön upp av sådant material. När den blir tillräckligt grund bildas kärr som i nederbördsrika områden med näringsfattig och sur mark utvecklas till mossar. Kanske kommer Gårdsjön att förvandlas till myr i framtiden.

Myr är ett samlingsnamn för mossar, kärr och blandmyrar. Mossarna är stora ris- och vitmossklädda våtmarker som får sin vattenförsörjning enbart från nederbörden. Det är mycket näringsfattigt på en mosse eftersom den enda näring som når högmossen kommer via regn och snö.

Kärren däremot tar emot mer eller mindre näringsrikt vatten från omgivande marker. Kärren delas in i fattiga, intermediära och rika kärr beroende på tillgången på mineralämnen, främst kalk, i tillrinnande vatten. Kring Gårdsjön finns enbart fattigkärr. Kring många mossar finns en ring av kärr. Denna brukar kallas lagg eller laggkärr. I laggkärren är floran rikare än på själva mossen. I Gårdsjöområdet finns gott om små myrar med smala bårder av laggkärr.

Vitmossor dominerar på mossarna. Dessa mossor växer i toppen, men dör i basen, och de döda delarna bygger upp mossen. Det döda växtmaterialet i mossen brukar kallas torv. De flesta arter av vitmossa gynnas av lågt pH och näringsfattigdom, och vitmossor är faktiskt ovanliga i kalktrakter som på Öland och Gotland, liksom i stora delar av övriga Europa. I den ymniga mossfloran i våtmarkerna kring Gårdsjön har ca 15 olika vitmossarter registrerats), bland annat de vanliga arterna granvitmossa *Sphagnum girgensohnii*, spärrvitmossa *S. squarrosum*, sumpvitmossa *S. palustre* och praktvitmossa *S. magellanicum*. Se bilder på sidan 16. Nedfall av kväve och utdikningar har medfört att växtligheten på många mossar förändrats, bland annat ökar tillväxten hos de små "martallarna" som är typiska för mossar.

Oceaniska växter

Utmed bäcken mot Lilla Hästevattnet, söder om Gårdsjön, finns en blandning av kärr- och mossvegetation. Här finns flera olika vitmossarter, bladvass, tranbär, rosling, pors, klockljung och den vackert gula myrlliljan *Narthe-cium ossifragum*. Det är en så kallad suboceanisk växt som enbart är vanlig sydvästra Sverige och i västra Jämtland, där det är lite fuktigare klimat än i övriga Sverige. Myrlliljan blommar under hög- till sensommaren och dess vetenskapliga namn betyder "den som ger benskörhet". I östra Sverige växer i stället skvattram *Ledum palustre* på myrarna, men denna art saknas i stort sett i västra Sverige.

Kring Gårdsjön finns även andra suboceaniska arter, till exempel de tidigare nämnda arterna klockljung och myrlilja. Båda förekommer helst i kärr och blöta myrar. Klockljungen är nära släkt med vanlig ljung men har större, uppblåsta och rosa blommor. En tredje, betydligt sällsyntare och mer oceanisk växt, är hedjohannesörten *Hypericum pulchrum* och kring Gårdsjön finns flera förekomster av denna art. Den växer, som det svenska namnet antyder, på hedar det vill säga betade och öppna utmarker. Hedjohannesörten förekommer i Sverige främst i mellersta Bohuslän och anses vara en kvarleva från den tid då området täcktes av sådana öppna eller halvöppna, betade utmarkshedmarker, för mer än 100 år sedan. Egendomligt nog verkar artens frön väckas upp från det förgångna då det sker någon sorts markbearbetning, som utmed körvägar, skogsbilvägar och liknande. Hedjohannesörten är rödlistad vilket betyder att den är upptagen på listan över hotade arter i Sverige.

Bland lavarna finns också flera arter med liknande utbredning, och som är typiska för västkustens ljumma, fuktiga klimat. På slät bark av hassel, rönn och al i fuktiga kärr påträffas havstulpanlav *Thelotrema lepadinum* och skriftlav *Graphis scripta*, och på fuktigt stående granar växer gammalgranslav *Lecanactis abietina* och kattfotslav *Felipes leucopellaeus*. Havstulpanlaven har fruktkroppar (apothecier) som liknar havstulpaner, skriftlavens liknar små skrivtecken och kattfotslavens fruktkroppar liknar kattfötter. Se bilder på sid 12.

Svampar

En karaktärsart för Gårdsjöns fuktiga och näringsfattiga marker är trattkantarellen, vars mörkt bruna, ganska svårupptäckta fruktkroppar visar sig på hösten, från september fram till den första frosten. Man tror att trattkantarellen har ökat som en följd av markförsurningen. En viktig del av forskningen kring Gårdsjön syftar till att studera och analysera de förändringar i växt- och djurlivet som följer olika typer av påverkan till exempel försurning eller kalkning.

Insektslivet

Insekterna är både Sveriges och världens mest artrika organismgrupp med flera miljoner kända arter i världen och drygt 30 000 i Sverige. De som du kanske mest lägger märke till kring Gårdsjön är myggor, flugor och trollsländor. Men kanske stöter du på en tordyvel på någon skogsstig, eller den vackra makaonfjärilen, vars larver lever på flockblommiga växter, till exempel kärrsilja, i kärr och vid sjöstränder. En annan insekt som du kan se spåren av är granbarkborren *Ips typographus*, vars vetenskapliga namn syftar på det mönster av larvgångar som arten åstadkommer under granarnas bark. Utglesade och ibland helt döda granar kring Gårdsjön orsakas av granbarkborrens angrepp. Granbarkborren är en av skogsbrukets allra värsta fiender och skapar skador i miljardklassen, särskilt efter varma, torra somrar.



Hedjohannesört *Hypericum pulchrum* är en rödlistad art som förekommer på några platser kring Gårdsjön. Den har vintergröna blad och blommor med röda ståndarknappar.



Granbarkborren *Ips typographus* angriper gran och orsakar trädöd.



A



D



B



C



E

Några lavar från Gårdsjöns omgivning. Blodlav *Mycoblastus sanguinarius* (A), gammelgranslav *Lecanactis abietina* (B), kattfotslav *Felipes leucopellaeus* (C), havstulpanlav *Thelotrema lepadinum* (D) och skriftlav *Graphis scripta* (E).

Artfattigt men individrikt fågelliv

Fågellivet kring Gårdsjön är individrikt men ganska artfattigt. Ett trettiotal arter häckar i markerna kring sjön. Nötskrikan är en av de mest framträdande arterna under sommaren – vacker och högljudd. Nötskrikan har en viktig funktion att fylla då den samlar och sprider ekollon som sedan kan gro till nya ekar. I Gårdsjöområdet finns också flera rovfåglar till exempel fiskgjuse och ormvråk samt ett flertal olika ugglearter. Tidigt på våren kan man höra visslingarna från den lilla sparvugglan. Trots sin litenhet är den en riktig tuffing. Om du härmar honom lite för intensivt ser han dig som en farlig konkurrent och attackerar, och rätt som det är har ugglan ryckt av dig mössan. Från sjön kan man ibland höra storlommens vemodiga läte.

Under höst och vinter drar större och mindre flockar av småfåglar genom skogen runt Gårdsjön. I dessa "meståg" slår sig talltitor, tofsmesar, svartmesar, kungsfåglar, nötväckor och trädkrypare ihop. Detta flockbeteende ökar fåglarnas chanser till överlevnad under vintern. Fåglarna genomsöker trädens kronor på jakt efter spindlar och annan lämplig föda. Man har funnit att arterna söker efter föda på olika ställen i trädkronan. Varje art har sin egen ekologiska nisch. Längst ute på grenarna håller de lättaste fåglarna, kungsfåglarna och svartmesarna, till. Grenarnas mellersta delar är tofsmesarnas område och längst in letar talltitorna mat. Stammen genomsöks av trädkryparen, som klättrar i en spiral från roten till toppen av trädet.

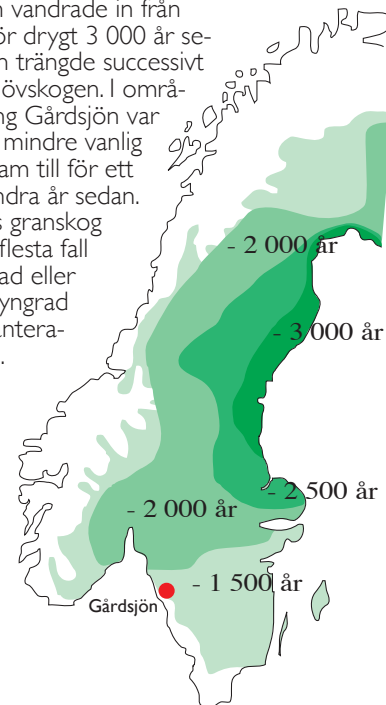
För hundra år sedan var landskapet mer öppet

Det man kanske inte tänker på är att stora delar av Svartedalen var ett trädfritt, hårt betat hedlandskap under 1800-talet. Får och nötkreatur betade vidsträckt utmarker. Ibland, när ljungtäckets blev tjockt och vedartat, brändes hedarna. Det landskap vi ser idag är resultatet av barrträdsplanteringar och en långt gången igenväxning av det en gång öppnare landskapet. Ännu längre tillbaka i tiden, för flera tusen år sedan, var området täckt med lövskog dominerad av ek. Granen, som är det vanligaste trädslaget i dagens landskap, trängde in i Sverige från nordost för drygt 3 000 år sedan, och kom till västra och södra Sverige i ganska sen tid. Den mer torktåliga och solälskande tallen kom söderifrån långt före granens invandring i Sverige.



Granskog angripen av granbarkborre.

Granen vandrade in från öster för drygt 3 000 år sedan och trängde successivt undan lövskogen. I området kring Gårdsjön var granen mindre vanlig ända fram till för ett par hundra år sedan. Dagens granskog är i de flesta fall planterad eller självföryngrad från planterade träd.



Rödlistade arter

I Sverige finns över 50 000 olika arter av växter, svampar och djur: 4 746 av dem är upptagna på "rödlistan" över hotade arter i Sverige (Artdata-banken 2020). Försumning, vattenföroreningar, mark-avvattning och avverkning av skog är allvarliga hot. Artdatabanken samlar in och analyserar uppgifter om rödlistade arter. Om du hittar en rödlistad art – rapportera gärna till Artportalen (www.artportalen.se).

Organismgrupp	antal rödlistade arter
fåglar	116
grod- och kräldjur	7
skalbaggar	933
fjärilar	549
kärlväxter	434
lavar	308
mossor	282
storsvampar	851
övriga grupper	1 266
Summa:	4 746

FAKTARUTA: Fridlysta arter

Cirka 585 av de cirka 50 000 kända växt- och djurarterna i Sverige är fridlysta i hela landet. Alla orkidéer, groddjur, kräldjur, fladdermöss och vilda fåglar är fridlysta i Sverige. Ytterligare 43 växt- och djurarter är fridlysta i vissa län.

Fridlysta arter i Gårdsjön

Alla grod- och kräldjur och alla fåglar är fridlysta. De arter, utöver fåglarna, som registrerats i området är åkergroda, vanlig groda, vanlig padda, snok, skogsödlå, kopparödlå, huggorm och hasselsnok. Av de växter som förekommer kring Gårdsjön är revlumner, lopplummer samt orkidéerna Jungfru Marie nycklar, grönvit nattviol och knärot fridlysta.

Rödlistade arter

Rödlistade arter är arter som minskar eller riskerar att dö ut om de inte får ett skydd eller om inte särskilda åtgärder vidtas. Det grundläggande syftet med rödlistorna är att utgöra underlag för beslut om olika typer av lagskydd och andra åtgärder för den biologiska mångfalden.

Hoten kan utgöras av jakt, fiske, föroreningar, skogs- eller jordbruk. I Sverige är för närvarande drygt 4 700 av våra ca 60 000 kända arter rödlistade. Antalet rödlistade arter är ganska ringa i Gårdsjöområdet men å andra sidan finns det sällan många rödlistade arter i sådana näringsfattiga och magra marker som Gårdsjöns. Exempel på rödlistade arter i Gårdsjöns omgivning är hedjohannesört, borsttåg, spillkråka och hasselsnok.

Nya listor vart femte år

Med fem års mellansrum uppdateras listorna över rödlistade arter. Listorna upprättas av speciella specialistkommittéer på uppdrag av ArtDatabanken vid Sveriges lantbruksuniversitet. Listornas giltighet fastställs sedan av regeringen.

Varför skall man bevara biologisk mångfald!

Det finns olika skäl att bevara biologisk mångfald men de viktigaste är att alla organismer har ett eget existensberättigande, att vi människor kan lära oss och dra nytta av deras egenskaper samt att de kan utgöra viktiga genetiska resurser i framtiden.

Fridlysta arter

Fridlysning är ett lagstadgat skydd för arter. Syftet med fridlysning är att skydda en växt- eller djurart som riskerar att försvinna eller utsättas för plundring. Fridlysning kan också ske för att uppfylla internationella åtaganden.

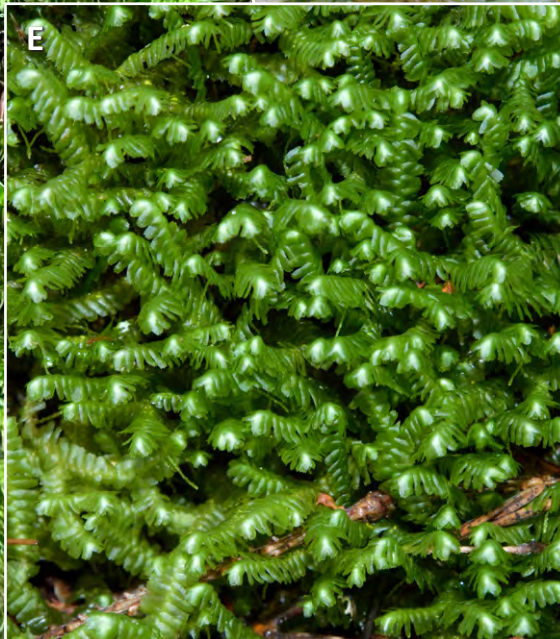
Fridlysningen ser lite olika ut för olika arter. För växtarter innebär fridlysningen oftast att man inte får plocka, gräva upp eller på annat sätt ta bort eller skada de fridlysta växterna. För djurarter innebär fridlysningen att man inte får döda, skada eller fånga de fridlysta djuren. Fridlysningen av fåglar gäller även deras ägg och bon, och i vissa fall även deras livsmiljöer. Vissa arter, till exempel hasselsnok och åkergroda, har ett starkare skydd som innebär att man inte heller får störa djuren, eller skada deras fortplantningsområden eller viloplats.

Uppslaget till höger: Några fridlysta arter i Gårdsjöns omgivning. A Revlumner *Lycopodium annotinum*, B vanlig snok *Natrix natrix*, C vanlig padda *Bufo bufo*, D grönvit nattviol *Platanthera chlorantha* och E hasselsnok *Coronella austriaca*.





Några typiska mossor i Gårdsjöns omgivningar är stor björnmossa *Polytrichum commune* (A), västlig hakmossa *Rhytidiadelphus loreus* (B), stor kvastmossa *Dicranum majus* (C), sotvitmossa *Sphagnum papillosum* (D), revlevermossa *Bazzania trilobata* (E) och stor bräkenmossa *Plagiochila asplenioides* (F).



Sjöarna i Svartedalsområdet



Vilken typ av sjöar som finns i ett område beror till stor del på omgivningarna. I sjöar omgivna av magra barrskogar med tunt jordtäckte är också sjöarna av näringsfattig typ vilket kallas oligotrofa. Sjöarna i Svartedalsområdet är näringsfattiga men kan däremot variera i hur bruna dom är. Det är så kallade humusämnen som ger vissa sjöar en brunaktig färg. Dessa ämnen kommer från skog och myrmarker i sjöns tillrinningsområde. Dessa ämnen bryts ned långsamt, sjöar med riktigt lång omsättningstid är därför ofta klarare än sjöar med kortare omsättningstid. Ett exempel på en mycket klar sjö i Svartedalsområdet är Torrgårdsvattnet, denna sjö har ett siktdjup på 10 till 15 meter. De näringsfattiga sjöarna i Svartedalen är också känsliga för försurning och de försurande utsläpp av främst svavel som släpptes ut i stora mängder under en stor del av 1900-talet bröt ned sjöarnas och omkringliggande markers förmåga att neutralisera den sura nederbörden. I de flesta av sjöarna gick försurningen på 60- och 70-talet så långt att fiskbestånden slogs ut. En omfattande kalkning av sjöar har genomförts i området för att återställa en vattenkemi där fisk och andra

Gårdsjön är en typisk "svartedalssjö".

Kalkning av Gårdsjön från båt (bilden till höger).

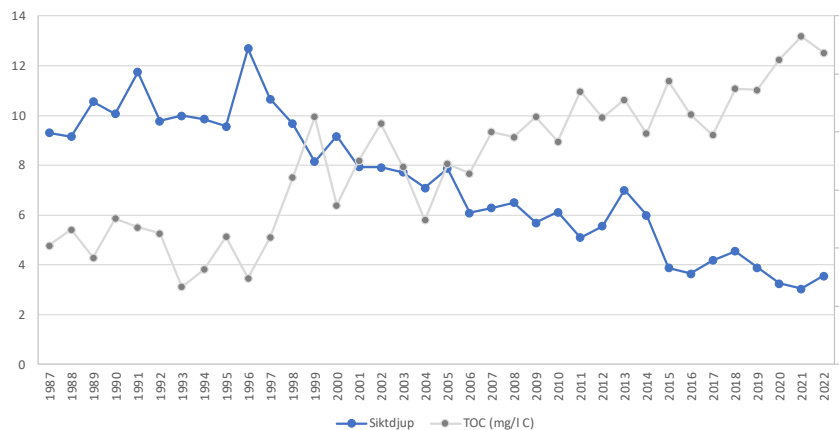
Torrgårdsvattnet (nedan) – en mycket klar och näringsfattig sjö i Svartedalsområdet.



djur och växter klarar att leva och fortplanta sig. Även om utsläppen glädjande har minskat märks spåren efter försurningen fortfarande då återhämtningen genom vittringsprocesser går långsamt i dessa magra omgivningar. Fortfarande behöver de flesta sjöarna i området därför kalkas för att inte återförsuras.

Brunare sjöar och vattendrag

Många sjöar i Sverige har på senare år blivit brunare, vilket också syns på sjöarna i Svartedalsområdet. I sjön Härsvatten har halterna av organiskt kol TOC (Total Organic Carbon) ökat från ca 2 mg/l på 90-talet till 4 – 5 mg/l idag. En



Organiskt material TOC (Total Organic Carbon; den högra y-axeln) har stadigt ökat medan siktdjupet (den vänstra y-axeln) har minskat i referenssjön Härsvatten som ligger i Svartedalsområdet.

följd av detta är att siktdjupet har minskat (se figur). Det har forskats mycket på orsaken till denna storskaliga trend och man tror att flera olika faktorer bidrar. De senaste årtiondenas klimatförändringar med kortare och blötare vintrar samt längre växtperioder har lett till en större transport av organiskt material till sjöarna. Intensivt skogsbruk med bland annat skogsmarksdikning medför också att det organiska materialet snabbare transporteras till sjöar och vattendrag. Ytterligare en förändring som ger brunare vatten är faktiskt den minskade försurningen. En förklaring kan vara att markens återhämtning har medfört ökande halter av löst organiskt material DOC (Dissolved Organic Carbon). Ju surare markvatten, desto mindre lösligt DOC. När omfattningen av försurningen var som störst var våra sjöar onaturligt klara.

Försurning

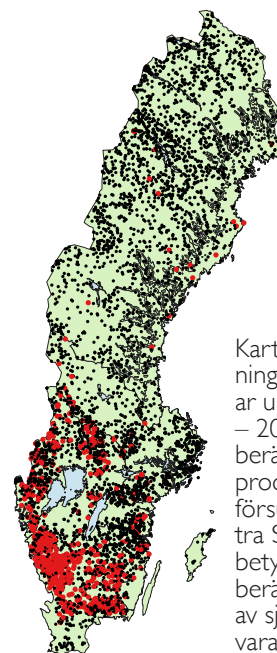
Försurningen slog ut fiskfaunan i många sjöar redan på 60- och 70-talet. Mörten är en av de känsligare arterna som redan vid pH 6 får problem med reproduktionen, medan abborre börjar få problem med reproduktionen om pH underskrider 5,5.

Försurningsstörda fiskbestånd syns därför oftast på ålderssammansättningen där yngre årsklasser saknas. I vattendragen är öringen tålig ner mot pH 5,6 medan lax och inte minst flodpärlmusslan kan påverkas redan vid pH strax över 6,0. Låga pH-värden i sig kan vara giftigt för fisk och bland annat minska kläckningen av rom. De låga pH-värdena är kanske inte den största orsaken utan kombinationen med ökad utlakning av aluminium och att detta ämne förekommer i giftiga former är oftast det mest problematiska för fisken. Sjöar med helt utslagna fiskbestånd får stora förändringar i hela ekosystemet där också vissa arter gynnas. Arter som gynnas är ofta sådana som lätt blir uppätta av fisk som till exempel dykarbaggar och vissa arter av trollsländor.

Ett annat exempel är tofsmyggor där det finns en svensk art, *Chaoborus flavicans*, vars larver har ett beteende som gör att den kan undvika fiskpredation, medan den andra svenska arten i släktet, *C. obscuripes*, saknar detta beteende och därför saknas i sjöar med fisk. Paleolimnologiska studier (där man undersöker rester av djur eller växter i sjöarnas sediment) har visat att mandibler från den sistnämnda arten kom in i de ytligaste sedimentlagren i sjöarna Gaffeln och Lilla Hästevatten medan den helt saknades i djupare sedimentlager. Ett tydligt bevis på att sjöarna hade ett fiskbestånd men att detta slogs ut vilket gjorde att *C. obscuripes* kunde invadera.

Blir det bättre?

Gårdsjön kalkas numera och har därför inte så stort värde som referenssjö men den närliggande Härsvatten har aldrig kalkats och här finns mycket värdefulla tidsserier på såväl vattenkemi som bottenfauna och plankton sedan slutet av 80-talet. Och här liksom i flera andra sura referenssjöar syns tydligt att det internationella arbetet med att reducera utsläppen av försurande ämnen fått positiva effekter. Sulfat minskar, pH och alkalinitet ökar och även om fisken inte kommit tillbaka än märks positiva effekter även på biologin, till exempel att antalet arter av växtplankton har ökat.



Kartan visar försurningsläget i Sveriges sjöar under perioden 2015 – 2020. I hela Sverige beräknades cirka sju procent av sjöarna vara försurade, men i sydvästra Sverige var andelen betydligt större – här beräknades en tredjedel av sjöarna fortfarande vara försurade.



Abborre
Perca fluviatilis



Tofsmygglarv
Chaoborus sp.

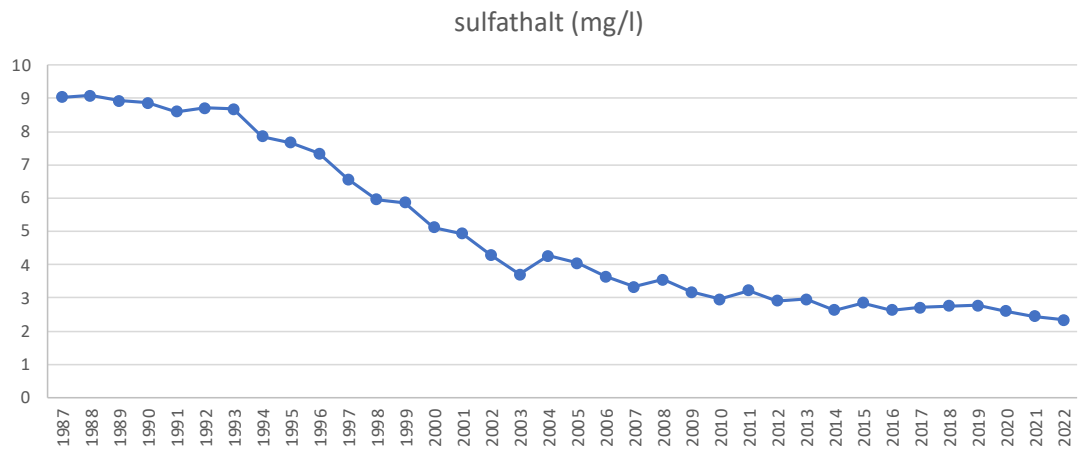


Buksimmare
Glaenocoris propinqua

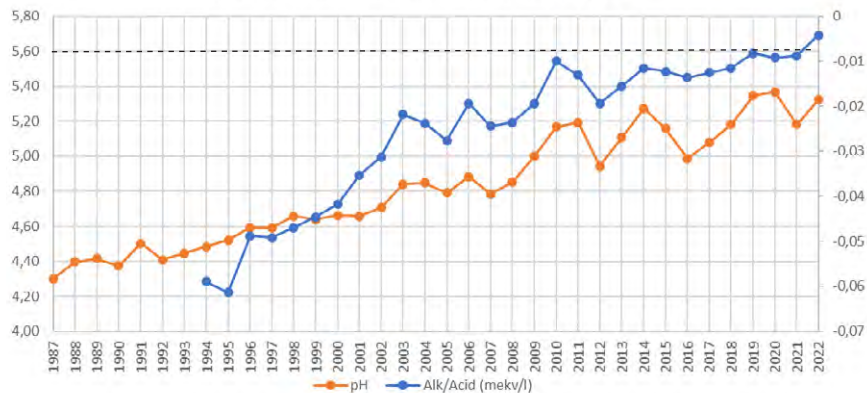


Referenssjön Hårsvatten i naturreservatet Svartedalen.

.....
Diagrammet till höger visar
minskningen av sulfathalten i
referenssjön Hårsvatten.
.....

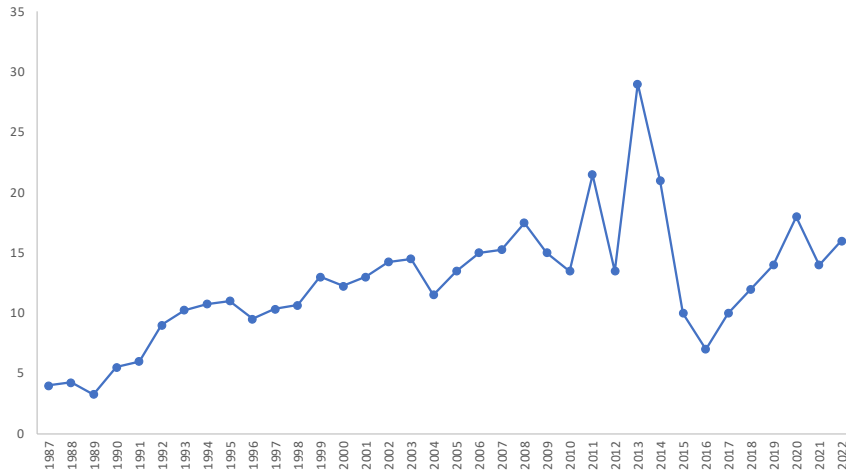


pH och alkalinitet i Härsvatten 1987-2022



Diagrammet ovan visar hur alkalinitet (blå linje, angivet som alk/acid, höger y-axel) och pH (röd linje, vänster y-axel) har återhämtat sig i referenssjön Härsvatten trots att sjön aldrig kalkats. Den streckade linjen, pH 5,6 motsvarar förindustriellt referensvärde som tagits fram med modellen Magic.

Antal växtplankton i Härsvatten 1987 - 2022



Antalet arter av växtplankton i Härsvatten har ökat markant sedan slutet på 80-talet men det är fortfarande lågt jämfört med sjöar opåverkade av förorening.

FAKTARUTA: Vattendirektivet

År 2000 upprättades en ram inom EU för arbetet med vatten, det så kallade vattendirektivet. Vattendirektivet införlivades i svensk lagstiftning 2004 genom vattenförvaltningsförordningen. Arbetet sker i 6-årscykler och målet är att alla vatten ska nå god kemisk och ekologisk status och att inga vatten får försämrats. Undantag från denna målsättning få endast ges om samhällsnyttiga verksamheter, som till exempel elkraftproduktion, påverkar den fysiska miljön och denna samhällsnytta inte kan ersättas på annat sätt som är bättre för miljön.

Nu är Sverige i uppstarten av den fjärde sexårscykeln men det är långt kvar innan vi når målen. Övergödning, förorening och miljögifter orsakar att vi inte når målen i många vatten.

Ett annat problem som kanske inte var lika uppmärksammat som miljöproblemmen innan vi började jobba med vattendirektivet är alla sätt som vi fysiskt påverkar våra vatten. Vandringshinder i form av dammar och dåligt lagda vägtrummor påverkar vandringsmöjligheten för bland annat fisk. Hydrologin är påverkad i många vatten av regleringar, rätningar och dikningsföretag.

Slutligen har vi ändrat morfologin på många sätt, bland annat genom att bygga och odla för nära vattendragen. Ända fram till 70-talet flottades också timmer i vattendragen och då rensades många vattendrag på alla strukturer som bidrar till variationsrika och rika miljöer men som var i vägen för timret.



A



B

Gårdsjöstugan (A). Insamlingskärl för krondropp (B). Paddyngel från Gårdsjön. Paddor är giftiga och äts inte av fisk, till skillnad från grodor. Därför finns det gott om paddor men färre grodor i Gårdsjön (C). Utsikt från Gårdsjöstugans föreläsningssal (D).



C



D

Kväve i skogen

Kväve – för mycket av det goda?

Nedfallet av kväveföreningar från atmosfären till jordens yta kan påverka ekosystem på olika sätt. Kvävenedfall är till en viss del en naturlig process. Problemet är att genom olika mänskliga aktiviteter ökar utsläppen av kväve till atmosfären, och då även nedfallet, till nivåer som är flera gånger högre än de naturliga. Kväve är ett viktigt näringsämne för tillväxten hos växter. Ett högre nedfall av kväveföreningar leder ofta till ökad produktivitet hos växter. I en brukad skog kan förhöjt kvävenedfall ha en positiv effekt i och med att virkesproduktionen ökar. Kvävenedfall på jordbruksmark kan också förbättra skördarna och öka gödseffektiviteten. Jordar är en viktig kolsänka som lagrar stora mängder organiskt kol och kvävenedfallet kan ha en positiv inverkan på kolbindningen inte bara i växtligheten utan även i marken. Kolbindning avser processen att fånga upp och lagra koldioxid från atmosfären, vilket bidrar till minskad mängd av koldioxid i atmosfären och därmed till att klimateffekten av koldioxid mildras.

Avigsidan med kvävenedfallet är att det även har en rad negativa effekter och att nedfallet drabbar hela landskapet, alltså inte bara de områden där det kan göra nytta. Förhöjt kvävenedfall på land kan orsaka övergödning av vatten när kvävet börjar läcka ut i vattnet och orsaka skadlig algbloomning och försämrad vattenkvalitet. Kvävenedfall kan också försura marken och minska markens bördighet genom utlakning av baskatjoner, till exempel kalcium och kalium. Om nedfallet är mycket högt under längre tid kan det även hämma växternas tillväxt. Ökad kvävetillförsel kan förändra balansen mellan olika mikroorganismer i marken, vilket leder till förändringar i produktion och konsumtion av metan och till ökad produktion av lustgas, två potenta växthusgaser, och därmed bidra till globala klimatförändringar.

Högt kvävenedfall kan också orsaka förlust av biologisk mångfald genom att de talrika naturligt kvävekänsliga växtarterna, liksom andra kvävekänsliga organismer såsom lavar och mossor, slås ut. Hög kvävedeposition kan på så sätt förändra ekosystemens sammansättning och minska den biologiska mångfalden. Höga halter av kväveoxider i atmosfären bidrar till bildning av ozon som är skadligt för både växtlighet och för människors hälsa. Och på tal om människors hälsa leder förhöjda halter av reaktivt kväve – i oxiderad eller i reducerad form – till partikelbildning som ytterligare påverkar människors hälsa negativt. Det är därför viktigt att arbeta målmedvetet för att genom minskade utsläpp av kväve till luft och vatten förhindra negativ påverkan på miljön, klimatet och människors hälsa.

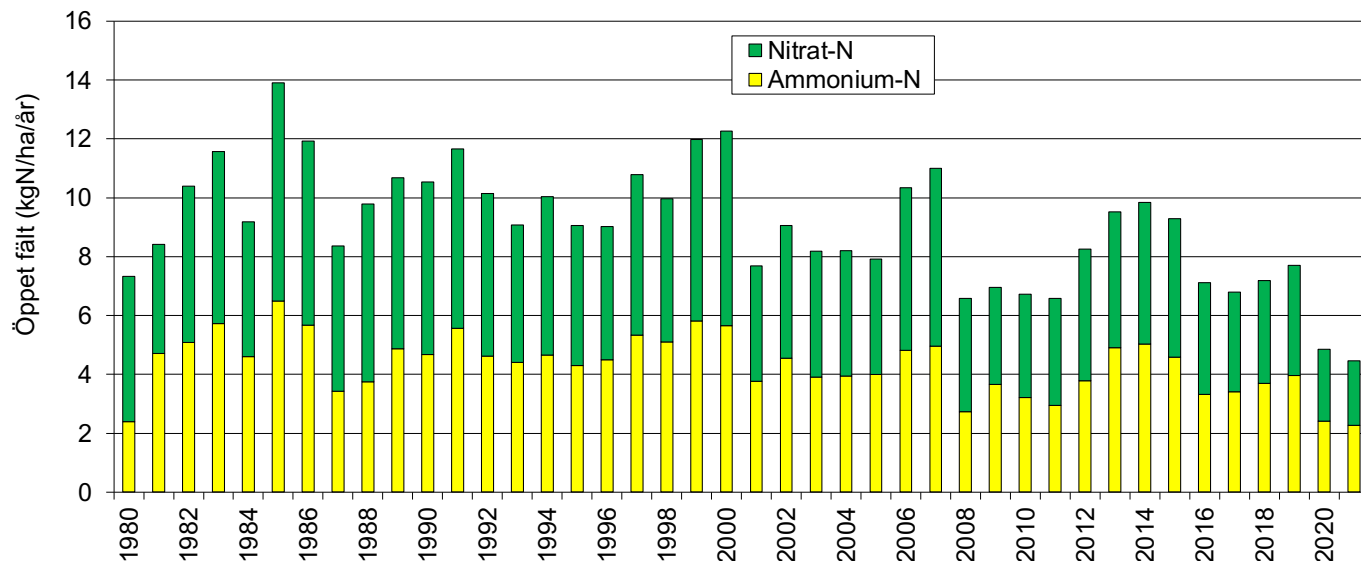


Trafiken släpper ut kväveoxider NO_x och jordbruket ammoniak NH_3 .

Sammanfattningsvis behövs kväve för allt liv, men det naturliga tillståndet är att kvävet i biologiskt tillgänglig form är en tillväxtbegränsande bristvara. Utsläppen av kväve till luften orsakar förhöjt atmosfäriskt nedfall som ofta är tillväxtstimulerande, men ökad tillväxt är sällan önskvärt i naturliga, lågproduktiva ekosystem och högre nedfall har förutom den ökade tillväxten flera andra konsekvenser.

Kvävenedfallets utveckling över tid

Kvävenedfallet minskar långsamt i både Sverige och övriga Europa, men nedfallet ligger fortfarande på en hög nivå och kommer inte att minska till bakgrundsnivåer under överskådlig framtid. Att exakt fastställa hur stort ett naturligt kvävenedfall har varit är svårt, men stora delar av mellersta och norra Sverige med ett längre avstånd från de största utsläppskällorna har oftast kvävenedfall på runt 2 kg per hektar och år.



Nedfall av kväve uppmätt på öppet fält vid Gårdsjön i form av nitrat (NO₃) och ammonium (NH₄).

Sverige är inte lika hårt drabbat av förhöjt kvävenedfall jämfört med flera europeiska länder med högre befolkningstäthet, mer och intensivare jordbruk, samt fler transporter och industrier. Men detta är sant främst i norra och delvis i mellersta Sverige där atmosfäriskt nedfall av kväve är lågt. Den södra och sydvästra delen av landet drabbas hårdare på grund av närheten till utsläppskällor i Sverige och utomlands.

De största utsläppen av kväve i Sverige kommer från jordbruket, som tillsammans med förbränning bidrar med mer än 80% av de totala inhemska utsläppen av kväve till atmosfären. Den största källan till kvävedeposition i Sverige utgörs

emellertid av långväga transport av kväve från utläppskällor utanför Sverige. En del av de svenska utläppen transporteras på motsvarande sätt med vindar utanför Sveriges gränser och orsakar problem i våra grannländer. Att påvisa negativa effekter av kvävenedfall i Sverige och i andra länder utgör ett viktigt argument i det internationella arbetet för att minska de totala utläppen.

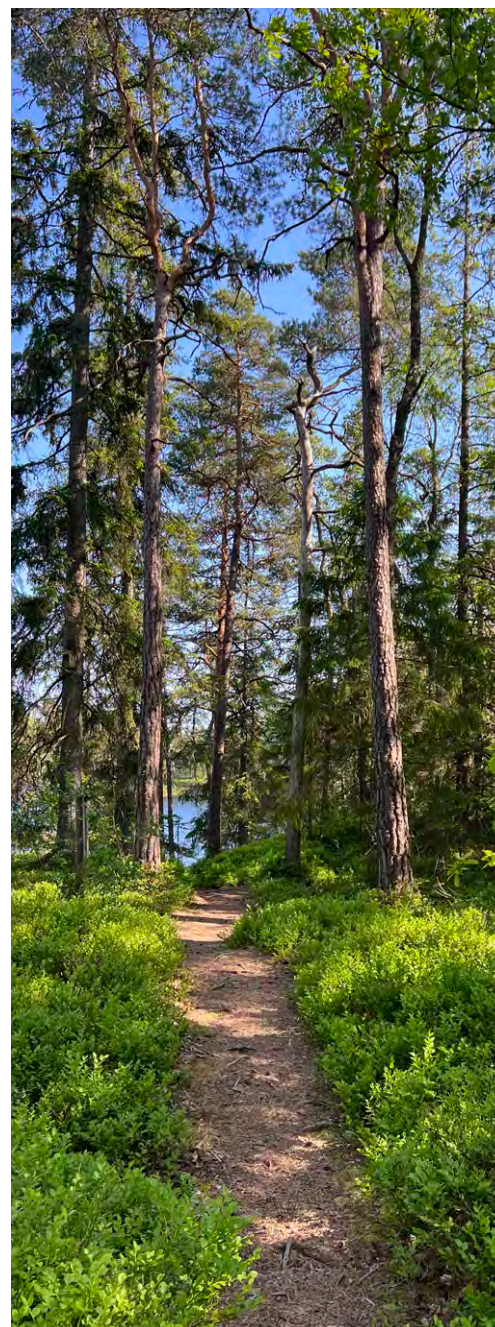
Forskning om kväve vid Gårdsjön

Effekter av kvävenedfallet på naturliga skogliga ekosystem har studerats vid Gårdsjön genom ett kvävegödslingsexperiment. Frågor som forskningen försöker svara på med hjälp av experimentet är: Kan man förutsäga tidpunkten när ett system blir kvävemättat? Kan gödselexperiment simulera effekterna av förhöjt atmosfäriskt nedfall? Finns det ett samband mellan kvävetillförsel och kväveutlakning? Leder utlakningen till försurning? Leder hög kvävetillförsel till toxicitetssymptom i träd och påverkar det naturliga växtsamhället?

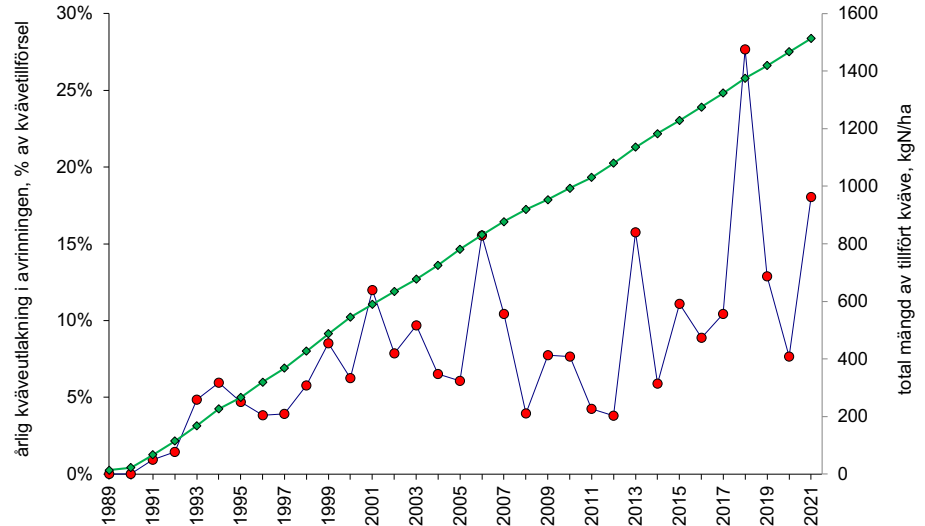
Gödning med 40 kg kväve per hektar och år i avrinningsområdet G2 vid Gårdsjön påbörjades 1991 som en del av det EU-finansierade NITREX-projektet (NITREX – NITrogen saturation EXperiment). Mätdata började samlas in i området två år innan behandlingen startades. Efter att NITREX-projektet avslutades 1995 har kvävebehandlingen fortsatt under en rad nationella och internationella projekt och har under lång tid också stöttats av Naturvårdsverket. Sammanlagt har avrinningsområdet kvävebehandlats sedan 1991 oavbrutet en till två gånger per månad, det vill säga i över 32 år i skrivande stund.

Om ett naturligt ekosystem utsätts för en hög och långvarig kvävebelastning antas det så småningom övergå från att vara ett kvävebegränsat system till att bli kvävemättat, med risk för utlakning av kväve och förändringar i artsammansättning. Det finns dock inte många dokumenterade fall där ett sådant systemskifte har kunnat beläggas. Området runt Gårdsjön är relativt kvävefattigt. Skogsmarkens humuslager har högt kolinnehåll men låg kvävehalt, med en kol/kväve (C/N) kvot på ca 35 (uttryck i gram). Innan gödningen startades fanns inget nitrat-kväve i avrinningsvattnet från området. Högt C/N och ingen eller obefintlig nitrathalt i avrinningen (eller i grundvattnet) är bra indikatorer på att avrinningsområdet inte är övergött. G2-området vid Gårdsjön blev därmed en perfekt kandidat för att genom kvävetillsatser undersöka experimentellt hur övergången till ett kvävemättat system går till.

Under de första fem åren efter gödningens början ökade halten kväve i bäcken proportionellt mot det ackumulerade tillskottet av kväve från gödningen. Antagandet i början på NITREX-projektet var att mer och mer kväve skulle lämna skogsområdet via avrinningen allteftersom mer kväve tillsattes, men så har utvecklingen inte sett ut. I stället har utlakningen lagt sig på en nivå mellan 5 och 10 % av det årligen tillförda kvävet, under en längre tid.



Utlakning av kväve från Gårdsjöns NITREX-område uttryckt i % av årlig kvävetillförsel (kvävenedfall+tillsats), och den totala mängden av kväve som har tillförts (grön linje, högra Y axeln).



Extrema väderförhållanden, avverkning eller insektsangrepp kan alla påverka utlakningen av kväve från ett skogsområde. Som framgår av figuren visar data insamlade under 2018 från NITREX-ytan på en ovanligt hög kväveutlakning som sannolikt kan knytas till den extremt torra sommaren det året som följdes av kraftigt granbarkborreangrepp på skogen i NITREX-området och i skogarna runt Gårdsjön. Den enskilda väderhändelsen innebär inte att skogsekosystemet fortsatte att läcka stora mängder oorganiskt kväve, vilket visas av de efterföljande två årens mätningar där utlakningen minskade från 28% efter torkan till 13% året efter och till 8% påföljande år. Däremot är det troligt att tillförseln av kväve till skogen gör att den tappar förmågan att hantera störningar utan att kväveläckage uppstår. Det närliggande kontrollområdet F1, som inte behandlas med kväve men också utgörs av en granskog som har angripits av granbarkborre under 2018 i jämförbar omfattning som NITREX-området, fortsätter att ha ingen eller mycket lite utlakning av oorganiskt kväve, oavsett variation i väder och trots de kraftiga granbarkborreangreppen.

Kvävetillförseln har påverkat inte bara utlakningen av nitrat. Andra effekter är till exempel att kvävehalten i barren har ökat och lustgasemissioner från marken har ökat i områdets fuktiga partier. Sammansättningen av markens svampsamhälle, som är så viktig för trädens upptag av näring, har förskjutits mot arter som trivs bättre vid hög kvävetillgänglighet. Markens bakteriella samhälle har också förskjutits från de som trivs främst i näringsfattiga förhållanden till de som föredrar näringsrikare miljöer. Det finns alltså bevis på att

många delar av skogsekosystemet, exempelvis avrinning-, grundvatten- och markvattenkemi, halter av kväve i barren, sammansättning och funktionalitet av mikrobiella organismer i marken, också har påverkats av den kraftigt förhöjda kvävetillförseln.

Emellertid kan vi inte notera att den höga kvävebelastningen som NITREX-området har utsatts för har lett till de katastrofala följder som för mycket kväve kan orsaka och har orsakat på andra ställen, till exempel i Nederländerna eller i delar av Tyskland. En trolig anledning till att det tillsatta kvävet i NITREX-området till stor del har omhändertagits av skogsekosystemet är att även om tillsatsen är stor jämfört med det årliga atmosfäriska nedfallet, är det trots allt en betydligt mindre mängd än det kvävet som redan fanns i marken och i skogen. Ytterliga faktorer är att marken till att börja med var extremt kvävefattig samt att kvävet har tillförts uppdelat i många små doser så att mikroorganismer och växtlighet har haft tid att anpassa sig. Att mätta ett kraftigt kvävebegränsat system till den punkt att inget mera kväve kan tas upp av varken mikrober, träden eller av annan växtlighet är en process som tar – som tur är – mycket kväve och tid. NITREX-projektet vid Gårdsjön visar hur viktigt det är med experiment över lång tid. Ett exempel är att den långsamma ökningen av nitrat i avrinningen gick stick i stäv med hypotesen att med så pass hög kvävebelastning kommer kväveutlakningen öka snabbt. Förväntningen av fortsatt kvävebehandling är att vi kommer ännu närmare svaren på frågor om kväve- och kolomsättning i skogen och om de långsiktiga effekterna av förhöjt kvävenedfall.



En skog fångar upp stora mängder kväve, en del av detta samlas i levande barr och i förna.



.....
Gårdsjöns vatten är kristallklart
på grund av näringsfattigdom
(brist på kväve och fosfor) och
lätt bruntonat av humusämnen
från kringliggande våtmarker
och barrskogar.
.....

Att övervaka miljön



Det finns olika sätt att utforska hur miljön påverkas av föroreningar, markanvändning och klimat. Ett sätt är att göra experiment där man kontrollerat utsätter exempelvis olika delar av ekosystem eller organismer i laboratoriet för behandlingar, som att tillföra gödande kväve (sid. 23), försurande ämnen (19) eller exponering för någon giftig gas som marknära ozon (39 och 43).

En annan viktig metod som används för att följa och förstå tillstånd i miljön är att noga studera utvecklingen av sådant som luftens föroreningshalter, vattnets pH-värde, förekomst av vissa växer och djur samt klimatfaktorer som temperatur och fuktighet under lång tid. Detta kallas miljöövervakning. En viktig sak när man övervakar miljön, förutom långsiktighet, är att man fortsätter använda samma, etablerade metoder, så att jämförbarheten över tid bevaras och trender eller förändringar som observeras inte beror på att man börjat mäta på ett nytt sätt.

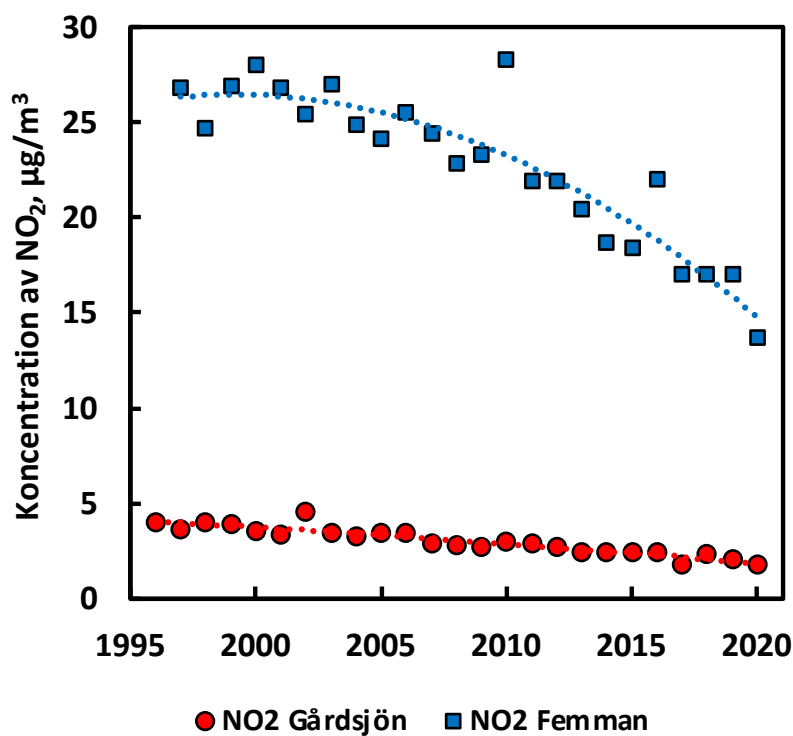
Av speciell betydelse vid Gårdsjön är att där finns en särskild provtagningsyta för så kallad integrerad miljöövervakning (IM), där man kombinerar en rad olika metoder för att följa utvecklingen i ett skogsekosystem. Detta är en av

I IM-ytan vid Gårdsjön mäter man bland många andra saker noggrant hur mycket vatten som flödar ut ur avrinningsområdet.

fyra sådana ytor i Sverige som ingår ett europeiskt nätverk med samma upplägg och där alltså verksamheten är internationellt samordnad. Den integrerade miljöövervakningen vid Gårdsjön inleddes 1991.

Övervakning av luftkvalitet

Övervakning av luftkvalitet görs både nationellt och lokalt för att följa upp om halterna når skadliga nivåer eller riktvärden för hälsa och ekosystem och för att utvärdera om de åtgärder som görs för att minska utsläppen ger resultat i miljön. I större städer bidrar koncentrationen av utsläppskällor, särskilt trafik men även annan förbränning och industriprocesser, till förhöjda halter av luftföroreningar som partiklar och kväveoxider. De kan ha viktiga effekter på människors hälsa och även påverka andra organismer. Lokala luftföroreningar påverkas starkt av hur kraftig luftblandningen är. När det är vindstilla blir halterna mycket högre än när det blåser och skillnaderna i halter varierar därför i hög grad med väderläget.



Bilden ovan. Passiva provtagare för gasformiga föroreningar som NO_2 och ozon fästs på undersidan av ett regnskydd. De exponeras vanligen under period från en vecka till en månad och analyseras sedan på laboratoriet för att fastställa den genomsnittliga halten under exponeringsperioden.

Figuren till vänster. Utvecklingen av koncentrationen av NO_2 1996–2020 vid Gårdsjön och på Femmanhusets tak i Göteborg.

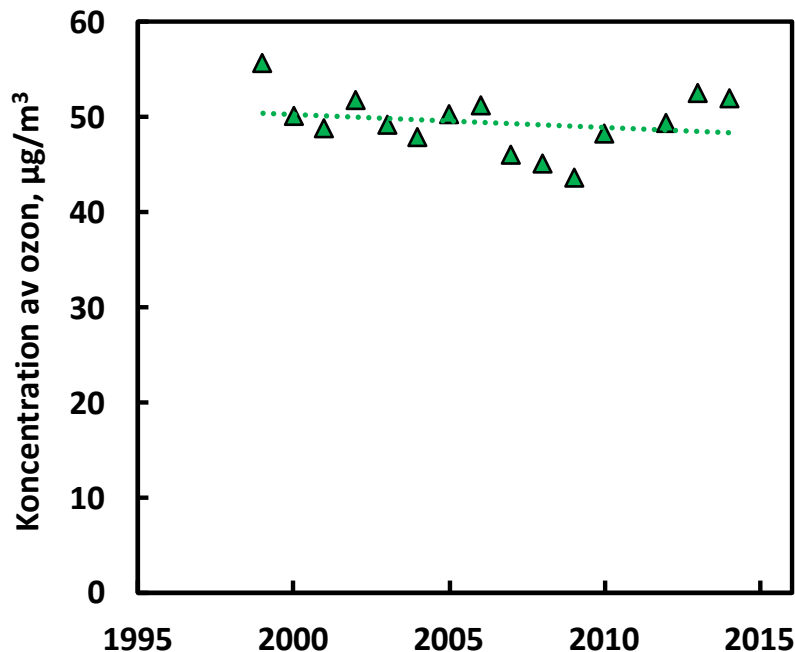
Kvävedioxid, NO_2 på kemiskt fackspråk, är en viktig luftförorening som kommer från olika typer av förbränning där den uppstår genom att luftens syrgas och kvävgas reagerar med varandra när de upphettas. NO_2 bidrar till en rad miljöproblem. Den kan omvandlas till salpetersyra och då bidra till försurning och övergödning. Bildning av marknära ozon är också beroende av NO_2 -halten. Dessutom är NO_2 i sig giftigt för både människor och växter.

Halten av NO_2 har mätts vid Gårdsjön sedan 1996 med hjälp av så kallade passiva provtagare, små "knappar" som tar upp föroreningen och som sedan kan analyseras på laboratoriet. Inne i större tätorter är NO_2 -halterna ofta ganska höga, huvudsakligen på grund av utsläpp från fordon med förbränningsmotorer. I figuren på föregående sida visas hur halterna av NO_2 utvecklas under perioden 1996–2020, både vid Gårdsjön och på Femman-husets tak i Göteborg där man övervakar halter av luftföroreningar i urban bakgrundluft i Göteborg. Två saker är tydliga i figuren. För det första är halterna i Göteborg betydligt högre än de vid Gårdsjön, vilket avspeglar att utsläppen är mycket större inne i stan. Då måste man också tänka på att halterna i gatunivå i Göteborg kan vara mycket högre än på Femman-husets tak som är beläget 30 meter ovanför den omgivande trafiken. Dessutom har halterna minskat betydligt. De har i stort sett halverats under den 25-årsperiod som mätningarna omfattar. Förbättringen beror på flera saker, men att en större andel fordon använder avancerad avgasreningsteknik eller eldrift är mycket viktigt för att minska NO_2 -utsläppen.

Man har även övervakat halten av marknära ozon vid Gårdsjön med passiva provtagare, fast inte under lika lång period som NO_2 . Som framgår i figuren på denna sida har ozonhalterna legat relativt konstanta. Man ser alltså ingen nämnvärd förbättring och det ser liknande ut på andra platser. Ozon, bildas i ljusdrivna, kemiska reaktioner i atmosfären där föroreningar som kväveoxider och flyktiga organiska föreningar ingår. Dessa processer tar tid och ozonbildningen fördelas därför över stora geografiska områden.

Miljöövervakning av vatten

Flera aktörer är inblandade i övervakningen av sötvatten i Sverige. Undersökningarna av sjöar och rinnande vatten görs med flera olika syften. Här ges exempel på tre viktiga frågeställningar som miljöövervakningen söker svar på.



Utveckling över tid hos luftens ozonhalt vid Gårdsjön.



För att förstå hur miljön i sjöar och rinnande vatten utvecklas är det viktigt att regelbundet undersöka vattnets kemiska sammansättning och vilka organismer som finns.

1. Vilka långsiktiga förändringar sker i sjöar som är relativt lite påverkade av lokala utsläpp?

Den nationella övervakningen utförs till stor del i sjöar och vattendrag som är opåverkade av lokala utsläpp från avlopp och industrier och med liten påverkan av jordbruk. I närheten av Gårdsjön finns referenssjön Härsvatten, som noga följts sedan mitten på 1980-talet och som nämnts redan i kapitlet Sjöarna i Svartedalsområdet. I de nationella så kallade trendsjöarna övervakar man vattenkemi men också växtplankton, bottenfauna och fisk. I den nationella övervakningen av sjöar ingår också ett program som kallas omdrevssjöar. Där ingår ett stort antal både påverkade och opåverkade sjöar men som bara provtas en gång vart sjätte år. Programmet representerar stora arealer och ger möjlighet att observera storskaliga förändringar, men är inte utformat för att följa utvecklingen i enskilda sjöar.

2. Hur går det för sjöar och vattendrag som kalkas?

Länsstyrelserna utför också viktig miljöövervakning. De har dels ett program som kallas regional miljöövervakning (RMÖ) men håller också i den övervakning som görs för att följa upp kalkningsinsatserna, som görs för att motverka försurning, för att säkerställa att dessa ger önskat resultat. Den så kallade kalkeffektuppföljningen (KEU) syftar till att övervaka detta. Många sjöar och vattendrag i Västsverige har varit eller är försurade om de inte kalkas. KEU är i Västra Götalands län mycket omfattande. I KEU följer man vattenkemin, där man i synnerhet är ute efter att studera hur lågt pH-värdet blir som lägst under året. Det är också viktigt att följa biologin i kalkade vatten vilket bland annat innebär provtagning av bottenfauna och fisk.

3. Hur påverkas sjöar och vattendrag av utsläpp från reningsverk och industrier?

Ytterligare en viktig aktivitet i svensk vattenövervakning är de undersökningar som vattenvårdsförbund eller vattenråd utför och som kallas samordnad recipientkontroll (SRK). Denna övervakning görs för att se vilken påverkan lokala utsläpp har på vattenkvaliteteten. Vattenvårdsförbund och vattenråd brukar utgöras av kommuner och företag som har lagkrav på sig att undersöka sina verksamheters påverkan på miljön. För att genomföra detta effektivt går man ihop i ett SRK-program.

Levande organismer som miljöindikatorer

I avsnittet om sötvatten ovan nämndes att man i vissa fall studerar levande organismer som plankton och fisk i övervakningen. Även i landmiljön använder man biologiska miljöindikatorer. Man kan studera i vilken utsträckning arter med olika känslighet för miljöpåverkan förekommer. En annan metod bygger på att man kontrollerar om de arter som förekommer, eller som man odlar som så kallade bioindikatorer, får vissa specifika symptom som kan kopplas till föroreningar. Bioackumulatörer kallas organismer, exempelvis utvalda växter, som tar upp stora mängder av metaller eller andra föroreningar och som kan analyseras med avseende på innehållet av sådana ämnen.

När det gäller marknära ozon är en viss form av tobak en klassisk bioindikator. Den utvecklar redan vid måttligt förhöjda ozonhalter karaktäristiska symptom i form av bleka (klorotiska) fläckar som med tiden blir bruna. Man upptäckte den höga ozonkänsligheten hos denna tobakssort när ozonhalterna blev allt högre i sydöstra USA kring 1950. På bilden här intill kan ett tobaksblad från en planta som odlats i omgivningsluften jämföras med ett från en planta som utvecklats i filtrerad luft på samma plats.

Lavar är en grupp organismer som kanske inte uppmärksammas så mycket. Som nämnts tidigare i denna skrift är de egentligen svampar som bildat symbios



Elfiske är en metod för att undersöka fiskbeståndet i vattendrag. Här har elfiske utförts i Anråse å i Tanums kommun och fisken mäts och registreras. Bilden visar en utvandringsskåp för laxunge (smolt).



En viss typ av tobak har använts mycket som indikator på förekomsten av föroreningen marknära ozon i luften. Bladet till vänster har exponerats för utomhusluften medan det till höger vuxit i filtrerad luft.

Den stiliga lunglaven är mycket känslig för luftföroreningar. Förr trodde man att den kunde bota sjukdomar i lungorna eftersom lavens yta liknar lungornas alveoler.



I miljöer med höga nivåer av luftföroreningar finns i stort sett inga lavar, däremot gröna alger på trädstammarna.



Där luften är ren är lavfloran rikare.



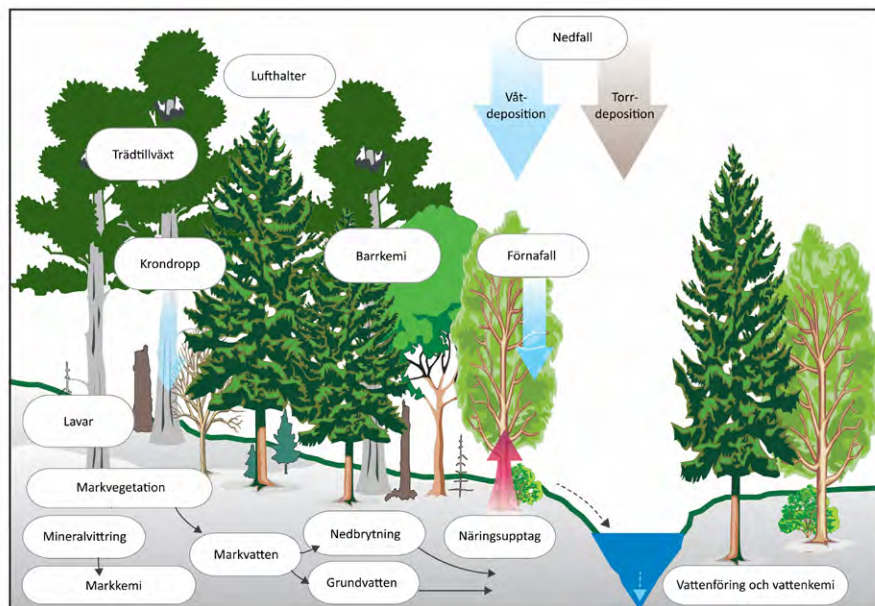
med alger och/eller cyanobakterier som bidrar med fotosyntes. På många sätt är lavar mycket härdiga mot sådant som torka, kyla, hetta och näringsfattiga förhållanden. Därför kan de växa på stenar, trädstammar och marker med låg fuktighet. Till skillnad från växter som har specifika mekanismer som kontrollerar upptaget av näringsämnen så tar lavar upp näring ospecificikt över sin yta. Då kan också giftiga ämnen följa med – man kan säga att lavarna har en låg integritet mot sin omvärld. Det innebär att de är förhållandevis känsliga för luftföroreningar som också tas upp. Redan under slutet av 1800-talet observerade man att lavar mer eller mindre försvann från områden inne i städer och i omgivningarna till industrier med höga luftföroreningshalter. De har därför använts i stor omfattning som bioindikatorer.

Känsligheten för föroreningar varierar mellan olika lavar. En del är tåliga mot luftföroreningar, medan andra är mycket känsliga. De kan också reagera olika på olika föroreningar. Den förorening som under en stor del av 1900-talet betydde mest för den starka utarmningen av trädstammarnas lavar i alla stora städer var svaveldioxid. Nu har halterna av denna förorening gått ner mycket kraftigt och många lavar har därför kommit tillbaka till stadskärnornas träd. Från att ha varit överdragna av ett tunt skikt av tåliga skorplavar och alger har blad- och buskformiga lavar åter etablerat sig. Lavar är dock känsliga för fler luftföroreningar än svavel. Även kvävedioxid påverkar lavar. Hos en del lavar har denna gas liknande negativa effekter som svaveldioxid, men kvävedioxiden

innehåller kväve som är ett viktigt näringsämne, vilket en del lavar kan utnyttja och faktiskt växa bättre. Skägglavar, tagellavar och lunglavar är mycket känsliga för luftföroreningar. Hittar man dem så tyder det på god luftkvalitet och det finns tecken på att även de återhämtat sig efter svavelföroreningarnas sorti.

Vid Gårdsjön sker övervakning av förekomst av lavar. De visar inte på några stora förändringar under de senaste decennierna, vilket kan tolkas som att luftkvaliteten i detta område inte förändras särskilt mycket.

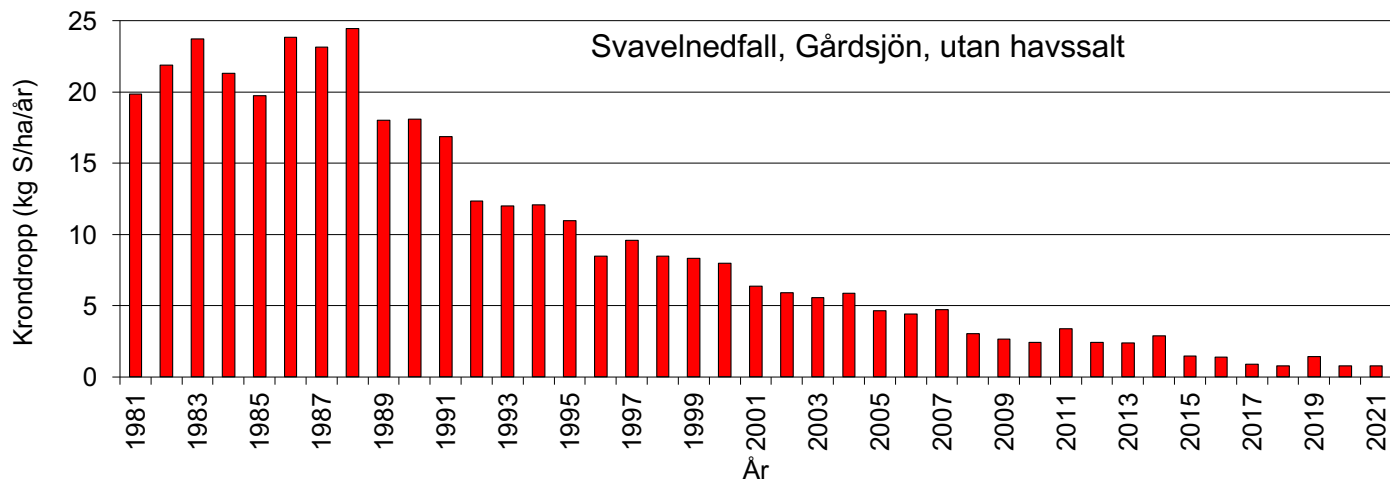
Mer om den integrerade miljöövervakningen vid Gårdsjön



I den integrerade miljöövervakningen beaktas flera olika aspekter på ekosystemet. Här ingår rent biologiska, som tillväxt hos träden och förekomst av olika växter, men även kemiska faktorer som nedfall av luftföroreningar, pH-värde och innehåll av ämnen i mark och vatten. Även hydrologiska processer måste bevakas, exempelvis vattenflödet genom området.

Avrinningsområdet F1 vid Gårdsjön är ett av fyra svenska områden som ingår i programmet Integrerad Miljöövervakning (IM). Upplägget lanserades i Sverige 1995 som en vidareutveckling av Naturvårdsverkets nationella Program för övervakning av miljökvalitet (PMK). De fyra svenska IM-områdena är valda för att täcka in olika geografiska, depositions- och klimatgradienter över landet, från ett mitt på sydsvenska höglandet i söder, via västkusten (F1 Gårdsjön), till ett område i Bergslagen och ett i mellersta Norrlands inland. De är alla avrinningsområden i skogsekosystem där det inte sker några skogsbruksåtgärder. De svenska IM-områdena finansieras av Naturvårdsverket, men ingår i ett större europeiskt nätverk där det finns över 50 IM-stationer i 17 länder.

Syftet med programmet är att övervaka och undersöka ekosystemeffekter orsakade av nedfall av långtransporterade luftföroreningar, främst kväve, svavel och tungmetaller och är kopplat till FN:s Luftkonvention och EU:s taktidirektiv.



Mätningarna vid Gårdsjön visar svavelnedfallet minskat stadigt och mycket kraftigt sedan 1980-talet som en följd av minskade utsläpp i Europa. Eftersom Gårdsjön ligger nära Västkusten tillförs ekosystemen sulfat också genom deposition av saltpartiklar. Det utgör inte en försurande förorening och har räknats bort.

Eftersom mätningarna ska användas för att särskilja effekter av mänsklig påverkan från naturlig variation inom ekosystemet krävs en långsiktig övervakning av både fysikaliska och kemiska processer i mark och vatten samt effekter på den levande floran och faunan. Inom F1-området i Gårdsjön utförs mätningar och analyser av vattenföring och vattenkemi i bäcken, kronddropp och nederbörd, analyser av kemi i markvatten och grundvatten, analyser av förnafall och nedbrytning av förna, kartläggning av algbeläggning på barr, skogstillväxt, markvegetation och markkemi, samt mätning av en mängd klimatparametrar som temperatur i luft och vatten och mark, regnmängd, vindhastighet, solinstrålning, med mera.

De data som samlas in rapporteras årligen till IM:s programcenter och sammanställs också i årsrapporter (<https://www.slu.se/institutioner/vatten-miljo/miljoanalys/integrerad-monitoring-im/im-publikationer/>) och finns sedan allmänt tillgängliga. Data från IM-programmen används som underlag för utvärdering av nuvarande miljötillstånd, effekter av miljöförbättrande åtgärder, och framtida prognoser av påverkan och återhämtning från nedfall av luftföroreningar. Data från IM-programmen används också som underlag för utveckling och utvärdering av modeller. I det avseendet är den stora fördelen att det finns en stor bredd i insamlade data (nedfall, lufthalter, vatten, mark, vegetation, klimat) över lång tid på en och samma plats. Tidserierna är användbara inte enbart för utvärdering av effekter av luftföroreningar, utan långsiktigt även för effekter av ändrat klimat.

Luftföroreningar & försurning – 50 år av gränsöverskridande luftvårdspolitik

Idag betraktas det som självklart att luftföroreningar är en internationell fråga, men så var det inte när Sverige och Norge i slutet på 1960-talet uppmanade de länder som släppte ut mest svavel att ta ansvar för sina utsläpp.

1. Luftkonventionen

Under 1970-talet konstaterades att tusentals sjöar och vattendrag i Sverige och Norge uppvisade allvarliga försurningsskador. Tack vare intensiv forskning och ett målmedvetet politiskt manövrerande av de svenska och norska regeringarna, lyckades man 1979 få till stånd ett nytt internationellt miljöavtal. Det fick namnet "Konventionen om gränsöverskridande luftföroreningar", men kallas numera helt enkelt "Luftkonventionen".

Nästan alla europeiska länder samt Kanada och USA är i dag medlemmar i Luftkonventionen, och med tiden har den kompletterats med mer konkreta tillägg, så kallade protokoll, som innehåller åtaganden och krav på minskningar av utsläpp.

Försurning och fiskdöd följs av skogsdöd

Vid början av 1980-talet larmades det om ökande skador på skog, först i dåvarande Västtyskland, men efterhand också i en rad andra länder. Begreppet "skogsdöden" blev allmänt känt, och även detta fenomen kopplades till de stora utsläppen av luftföroreningar. Det faktum att allt fler länder drabbades av luftföroreningarnas härjningar ökade det politiska trycket på åtgärder för att minska utsläppen. Fokus riktades främst mot utsläppen av svavel- och kväveoxider från kolkraftverk och bilar.

Bättre kunskap om luftföroreningarnas skadeverkningar på naturen bidrog starkt till Luftkonventionens första åtgärdsprotokoll 1985. De 21 länder som undertecknade protokollet lovade att minska sina svavelutsläpp med minst 30 procent under perioden 1980 till 1993. Därefter följde 1988 ett protokoll om kväveoxider, och 1991 ett om flyktiga organiska ämnen.

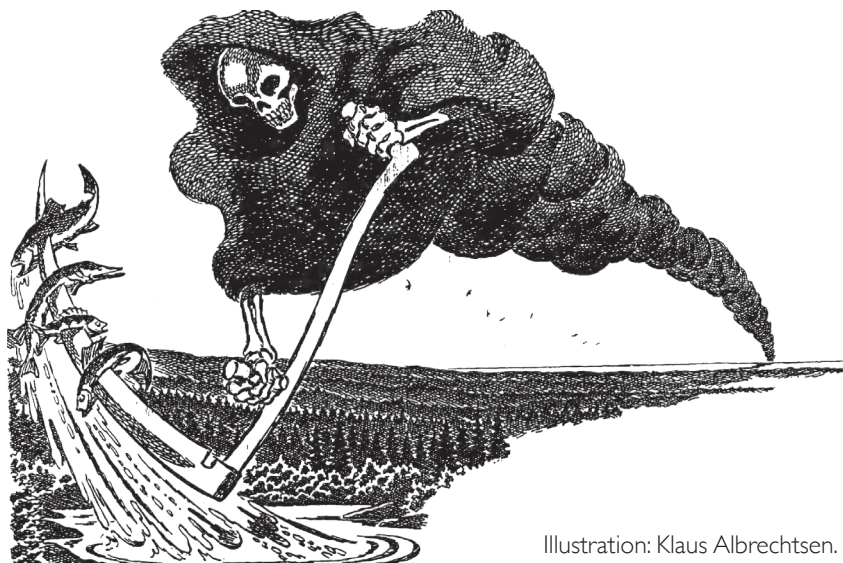


Illustration: Klaus Albrechtsen.



I Mellaneuropa, särskilt i bergsområden, uppträdde omfattande skogsskador och i en del fall ren skogsdöd, under andra halvan av 1900-talet. Bilden är från Tjeckien.

FAKTARUTA: Viktiga miljö- och hälsoskadliga luftföroreningar

Svaveldioxid: Den viktigaste mänskliga källan till utsläpp av svaveldioxid (SO_2) är förbränning av svavelhaltiga bränslen som kol och olja, men även vissa industriprocesser bidrar. SO_2 omvandlas i atmosfären och kan bilda svavelsyra, vilket bidrar till försurning av mark och vatten. SO_2 kan också reagera med ammonium och bilda ammoniumsulfat, vilket bidrar till förhöjda halter av $\text{PM}_{2,5}$.

Kväveoxider (NO_x) är samlingsnamn för kväveoxid (NO) och kvävedioxid (NO_2) som bildas då luftens syre och kväve reagerar vid höga temperaturer, d.v.s. i samband med förbränning. Biltrafiken är den största källan i de flesta tätorter, men även energiproduktion, arbetsmaskiner och sjöfart är betydande källor. Tillsammans med organiska föreningar och solljus medverkar NO_x till bildandet av marknära ozon. NO_x kan även reagera med ammonium och bilda ammoniumnitrat, vilket bidrar till förhöjda halter av $\text{PM}_{2,5}$. Nedfall av kväveföroreningar, både NO_x och ammoniak, bidrar till försurning och övergödning av mark och vatten.

Ammoniak: Utsläpp av ammoniak (NH_3) till luft uppstår framför allt vid hantering och spridning av stallgödsel samt användning av mineralgödsel inom jordbruket. Ammoniak bidrar till bland annat försurning, övergödning och förhöjda halter av hälsoskadliga partiklar.

Flyktiga organiska ämnen (VOC) är en samlade benämning av föroreningar, som i närvaro av solljus och tillsammans med kväveoxider bildar marknära ozon, och förkortningen NMVOC anger flyktiga organiska ämnen, men undantag av metan (NM=Non-Methane). VOC kan bildas vid ofullständig förbränning, men

forts. nästa sida

Under 1980-talet lyckades forskare i internationellt samarbete under Luftkonventionen ta fram ekologiskt baserade kritiska belastningsgränser för olika naturmiljöer och växter. Lite förenklat innebär detta att man kunde ange hur stor föroreningsbelastning som anses vara "acceptabel" med hänsyn till ekosystemens känslighet för föroreningar. Därmed blev det också möjligt att beräkna hur mycket utsläppen behövde minskas för att undvika skador.

Det andra svavelprotokollet, som skrevs under i Oslo 1994, undertecknades av 26 länder samt av den Europeiska Unionen (EU). En stor nyhet i detta protokoll var att olika krav ställdes på de enskilda länderna. Fördelningen länderna emellan gjordes i syfte att uppnå största möjliga förbättring i miljön till lägsta sammanlagda kostnad, vilket beräknades med hjälp av avancerad datormodellering och hänsyn till variationen i naturens känslighet för svavel.

Göteborgsprotokollet

Ytterligare utveckling av datormodelleringen bidrog 1999 till "Protokollet om att minska försurning, övergödning och marknära ozon", mer känt som Göteborgsprotokollet eftersom det undertecknades i Göteborg. I detta tas ett samlat grepp om tre miljöproblem och de fyra föroreningar som orsakar dem: svaveldioxid (SO_2), kväveoxider (NO_x), ammoniak (NH_3) och flyktiga organiska ämnen (NMVOC).

Protokollet fastställer bindande nationella utsläppstak för de fyra luftföroreningarna, att uppnås 2010 och därefter inte överskridas. Protokollet innehåller också utsläppsgränsvärden för exempelvis kraftverk och motorfordon samt bränslekrav.

Efter flera års förhandlingar reviderades Göteborgsprotokollet 2012. Förutom de fyra tidigare nämnda luftföroreningarna tillkom nu också små partiklar ($\text{PM}_{2,5}$), för att ytterligare förbättra skyddet av människors hälsa. Utsläppstaken ersattes med åtaganden om procentuella nationella utsläppsminskningar från basåret 2005 till måläret 2020. Dessutom uppdaterades och skärptes utsläppsgränsvärdena för olika sektorer.

2. EU:s luftvårdspolitik

Traditionell EU-politik på miljöområdet är att med hjälp av tekniska krav reglera olika verksamheter, exempelvis utsläpp från bilar och stora förbränningsanläggningar. De krav som ställts har vanligtvis baserats på redan väl etablerad teknik, och har därmed sällan inneburit pådrivande teknik- eller systemomställningar.

Vid mitten av 1990-talet började Luftkonventionens arbete med kritiska belastningsgränser och datormodellering för att identifiera kostnadseffektiva åtgärder få genomslag också i EU:s luftvårdsarbete.

Efter initiativ av Sverige, som blev medlem i EU 1995, utarbetade EU-kommissionen en strategi för att stoppa försurning, som presenterades 1997. Den utgick från det miljömål som redan 1993 antogs i EU:s femte miljöhandlingsprogram, nämligen att det övergripande långsiktiga målet är att de kritiska belastningsgränserna för försurning inte ska överskridas. I försurningsstrategin föreslogs ett första delmål för utsläppsminskningar av försurande luftföroreningar (SO_2 , NO_x och NH_3) till år 2010 och en rad åtgärder för att nå dit.

Utsläppstakdirektivet

Försurningsstrategin följdes av en ozonstrategi, och tillsammans utgjorde dessa grunden för ett nytt EU-direktiv som antogs 2001 och fastställde bindande nationella utsläppstak för fyra hälsoskadliga, försurande och övergödande luftföroreningar, att uppnås senast 2010 – alltså samma konstruktion som Göteborgsprotokollet.

Utsläppstakdirektivet, som uppdaterades och reviderades 2016, är EU:s viktigaste övergripande direktiv för att minska utsläppen av luftföroreningar. I direktivet har varje land tilldelats nationella mål för utsläppsminskningar att uppnås i två steg (2020 och 2030) för de fem föroreningarna SO_2 , NO_x , NH_3 , NMVOC och $\text{PM}_{2,5}$. De tre förstnämnda är försurande, NO_2 och NH_3 bidrar till övergödning, medan NO_x och NMVOC tillsammans bidrar till bildningen av marknära ozon, och alla fem bidrar till hälsoskadliga partikelhalter i luften.

Direktivet innehåller också mål för hur mycket försurningen, kväveövergödningen, halterna marknära ozon och människors exponering för skadliga partiklar i luften ska minska till 2030.

Utöver utsläppstakdirektivet finns en rad EU-regler som begränsar utsläppen av luftföroreningar från olika källor, som t.ex. personbilar, lastbilar, arbetsfordon, förbränningsanläggningar och industrier. Vanligtvis uppdateras och revideras dessa regler med 5–10 års mellanrum.

Luftkvalitet och hälsa

Under 1970- och 1980-talen motiverades luftvårdspolitikerna främst av skador på naturmiljön – inte minst fiskdöd och skogsdöd, men också biologisk mångfald. Under 1990-talet ökade kunskaperna om luftföroreningarnas skadliga effekter på människors hälsa. Det faktum att dessa hälsoskador också lättare kunde värderas i ekonomiska termer, bidrog till att ytterligare stärka argumenten för att minska utsläppen.

Experter vid den Europeiska miljöbyrån (EEA) har uppskattat att förhöjda halter av små partiklar ($\text{PM}_{2,5}$) 1990 orsakade ungefär 1 miljon förtida dödsfall årligen i EU. Tack vare minskade utsläpp halverades denna siffra till 2005. Den samhällsekonomiska kostnaden för överdödlighet och sjuklighet orsakad av $\text{PM}_{2,5}$ beräknades för år 2005 uppgå till mellan 385 och 1088 miljarder euro inom EU.

kan även släppas ut från till exempel bensinångor och lösningsmedel som avdunstar. En del flyktiga organiska ämnen används som lösningsmedel vid industriella processer, samt för färg och lack.

Partiklar: Vanliga mått på partiklar är $\text{PM}_{2,5}$ och PM_{10} , vilket förenklat anger massan av partiklar i luften som är mindre än 2,5 respektive 10 mikrometer (μm) i diameter. När dessa partiklar andas in kan de nå ner i andningsorganen och orsaka negativa hälsoeffekter både på kort och lång sikt. De större partiklarna bildas t.ex. vid slitage av vägtytor på grund av dubbdäck, medan de mindre partiklarna främst kommer från olika förbrännings- och industriprocesser. Därtill kommer sekundärt bildade små partiklar, som ammoniumsulfat och ammoniumnitrat, från SO_2 , NO_x och NH_3 . En stor andel av de små partiklarna, även i urban bakgrundsluft, är långdistanstransporterade.

Marknära ozon (O_3) bildas i förorenad luft under inverkan av solljus. Kväveoxider och flyktiga organiska ämnen från såväl naturliga som mänskliga källor bidrar till att marknära ozon bildas. Ozon är långlivat i atmosfären och kan färdas långa sträckor. Ozon kan lokalt brytas ned av kväveoxid från bilavgaser och därför kan ozonhalten bli lägre i storstäder än på landsbygden.

Kolväten är en stor grupp ämnen som består av enbart kol och väte. De innefattar aromatiska kolväten, t.ex. bensen som är det enklaste aromatiska kolvätet. En undergrupp till aromatiska kolväten är polycykliska aromatiska kolväten (PAH), med bl.a. bens(a)pyren. Flera kolväten är direkt hälsoskadliga och orsakar bland annat cancer. Bens(a)pyren och andra PAH:er bildas vid ofullständig förbränning. Småskalig vedeldning och trafik är de viktigaste källorna till bens(a)pyren i luft i Sverige.

Källa: Naturvårdsverket.



Sedan 1979 genomförs Luftkonventionens internationella förhandlingar om minskade utsläpp av luftföroreningar i FN-huset i Geneve, Schweiz.

1996 antog EU ett ramdirektiv om luftkvalitet som de närmaste åren byggdes på med ytterligare direktiv som fastställde bindande luftkvalitetsnormer för en rad olika föroreningar. Efter en översyn av luftvårdslagstiftningen ersattes de flesta av dessa direktiv av ett nytt samlat luftkvalitetsdirektiv, som antogs 2008.

Trots att EU:s luftkvalitetsnormer är betydligt svagare än de vetenskapligt baserade riktvärden för att skydda människors hälsa som tagits fram av FN:s Världshälsoorganisation (WHO), överskrids de fortfarande på många platser. Efterhand har det framgått att många av EU:s medlemsländer inte vidtagit de utsläpps begränsande åtgärder som krävs för att klara luftkvalitetsnormerna, särskilt vad gäller PM_{10} (som skulle klarats 2005) och NO_2 (som skulle klarats 2010). Dessa länder riskerar drabbas av höga böter om de fällt i EU-domstolen. Hösten 2022 drev EU-kommissionen 28 rättsfall (omfattande 18 länder) om överskridanden av luftkvalitetsnormer i EU-domstolen.

Efter en tvåårig översyn av luftkvalitetsdirektivet, presenterade EU-kommissionen 2022 ett förslag till revidering, i syfte både att säkerställa ett bättre genomförande och att skärpa gränsvärdena så att dessa bättre skall återspegla WHO:s rekommendationer.

Enligt den Europeiska miljöbyråns rapportering 2022, lever mer än 90 procent av EU:s stadsboende befolkning i en miljö där föroreningshalterna i luften av $PM_{2,5}$, NO_2 och O_3 överstiger de riktlinjer för god luftkvalitet som rekommenderas av WHO.

3. Luftföroreningar från internationell sjöfart

Det helt dominerande bränslet för fartyg i internationell trafik har sedan 1960-talet varit högsvavlig tjockolja, en slags restprodukt från raffinaderierna med en genomsnittlig svavelhalt på mellan 2,5 och 3 procent. Detta kan jämföras med att dieselmotorer som används i fartyg i inlandsjöfart och i lastbilar maximalt får innehålla 0,001 procent i EU. Förbränningen i fartygens dieselmotorer resulterar också i stora utsläpp av kväveoxider. Trots detta saknade internationell sjöfart länge luftföroreningsregler, och utsläppen fortsatte därför att öka och blev allt viktigare i takt med att landbaserade utsläpp började minska under 1980-talet.

Mot bakgrund av försurningsproblemen började Norge och Sverige i slutet av 1980-talet driva krav inom FN:s internationella sjöfartsorganisation (IMO) på minskade svavelutsläpp, vilket 1997 resulterade i ett nytt protokoll (kallat Annex VI). Men motståndet mot att införa krav på sjöfarten var stort, och det dröjde ända till 2005 innan de nya reglerna trädde i kraft. Samma år utvidgades också EU:s direktiv om svavel i bränslen att omfatta sjöfartens tjockoljor, med svavelkrav i stora drag som de i IMO:s Annex VI.

Sverige insåg att verkningsfulla globala regler skulle dröja, och tog tidigt saken i egna händer genom att 1998 införa ett system med miljödifferenterade farleds- och hamnavgifter. Det innebar i korthet att de fartyg som körde på lågsavvligt bränsle och renade sina utsläpp av kväveoxider kom billigare undan, medan de mer förorenande fartygen fick betala desto mer – något som visat sig effektivt, särskilt när det gäller svavel.

Svaga krav och långsamma framsteg

Rent allmänt var 2005 års IMO- och EU-krav svaga och tämligen verkningslösa, med undantag för svavelkraven inom särskilda svavelkontrollområden. De enda havsområdena med sådan status var då Östersjön och Nordsjön, och här blev det från 2006/2007 inte längre tillåtet att använda fartygsbränslen med en svavelhalt på mer än 1,5 procent.

Efter att både EU och USA sent omsider insett sjöfartens ökande bidrag till de skadligt höga luftföroreningshalterna, påbörjades 2005 nya förhandlingar i IMO för att revidera och skärpa Annex VI, vilket 2008 ledde till nya tuffare krav. För den globala sjöfarten skärptes svavelkravet i två steg, från 4,5 till 3,5 procent från 2012 och sedan till 0,5 procent från 2020.

Inom svavelkontrollområden skärptes kravet till 1,0 procent från 2010 och sedan till 0,1 procent från 2015. Förutom Östersjön och Nordsjön är hela USA:s och Kanadas kustlinje svavelkontrollområden. Och 2022 beslutade IMO att även Medelhavet blir ett svavelkontrollområde från 2025.

Kraven på kväveoxider skärptes också 2008, så att fartyg som byggts efter 2011 måste ha cirka 20 procent mindre utsläpp. Inom särskilda NO_x-kontrollområden måste nybyggda fartyg minska NO_x-utsläppen med cirka 80 procent. Sedan 2016 finns ett NO_x-kontrollområde i Nordamerika, och från 2021 också i Östersjön och Nordsjön.

Fartyg i havsområdena runt Europa släppte år 2000 ut 4,1 miljoner ton NO_x och 2,2 miljoner ton SO₂. De nya svavelkraven har till slut gett resultat, och 2020 hade sjöfartens svavelutsläpp minskat med nästan 90 procent. De svagare NO_x-kraven har dock minskat utsläppen bara med ungefär en tredjedel. Om inga nya NO_x-begränsande åtgärder genomförs, riskerar sjöfartens NO_x-utsläpp öka, en utveckling som skulle kunna innebära att internationell sjöfart runt Europa år 2030 skulle släppa ut ungefär lika mycket kväveoxider som samtliga landbaserade källor i EU:s 27 medlemsländer tillsammans.

4. Förändring över tid

Eftersom föroreningarna inte känner några gränser är luften en i högsta grad internationell fråga. Det internationella samarbetet om forskning och åtgärds politik inom Luftkonventionen och EU har varit mödosamt och tidsödande – alltför långsamt anser miljörelsen. Men det har också levererat mätbara och synliga resultat.



Fartyg är mycket större utsläppare av luftföroreningar än vad de flesta tror. Efter årtionden av internationella förhandlingar har till slut sjöfartens svavelutsläpp minskats rejält. Men ännu återstår att överenskomma och få till stånd åtgärder som snabbt och effektivt minskar också NO_x-utsläppen.

I hela Europa har svavelutsläppen från landbaserade källor minskat med mer än 90 procent, jämfört med när de var som högst runt 1980, och utsläppen av NO_x och NMVOC har mer än halverats. Däremot har ammoniakutsläppen, som huvudsakligen kommer från jordbruket, bara minskat marginellt, med cirka 16 procent. Inom EU har man lyckats lite bättre än i Europa som helhet, vilket framgår av figur A på nästa sida.

Dessa utsläppsminskningar har följts av kraftigt minskat nedfall av försurande svavel, vilket i sin tur påtagligt har reducerat överskridandet av den kritiska belastningen för försurning i Europa, från 39 procent av ekosystemarealen år 1980, till mindre än 4 procent 2020. I Sverige har den överbelastade arealen mellan 1980 och 2020 minskat från 50 procent till 2 procent. Se figur B, som även anger förändringen i EU-27.

Eftersom utsläppen av kväveföreningar (NO_x och NH₃) inte minskat alls lika mycket som svavlet, är förbättringen när det gäller överbelastning av övergödande kväve (eutrofiering) betydligt blygsammare. Som framgår av figur C, har andelen ekosystem i Europa som utsätts för överbelastning endast minskat från 80 procent till 62 procent mellan 1980 och 2020.

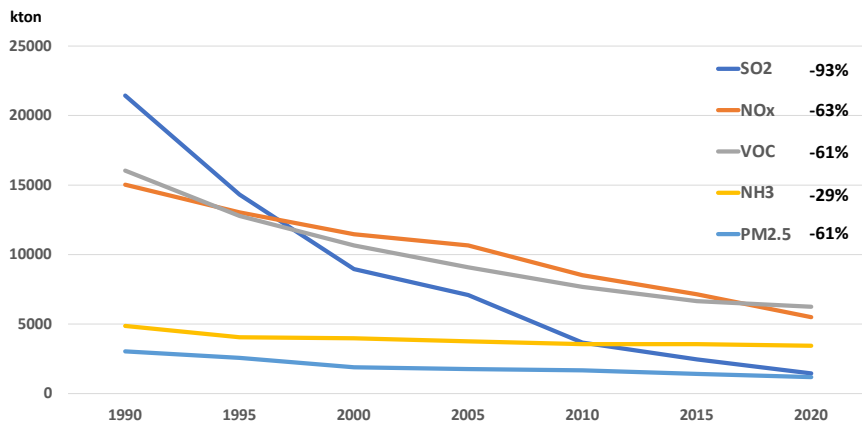
Inom EU utsattes 2020 fortfarande mer än en miljon kvadratkilometer av känsliga ekosystem för överbelastning av kväve, och drygt hundra tusen kvadratkilometer för överbelastning av försurande nedfall, med bl.a. skador på den biologiska mångfalden som följd.

Halterna av marknära ozon varierar påtagligt mellan olika år, bland annat beroende på väderlek och temperatur. Under perioden 2000 - 2020 överskreds den kritiska belastningen på 75 – 95 procent av EU:s jordbruksareal och på 60 – 98 procent av skogsmarksarealen.

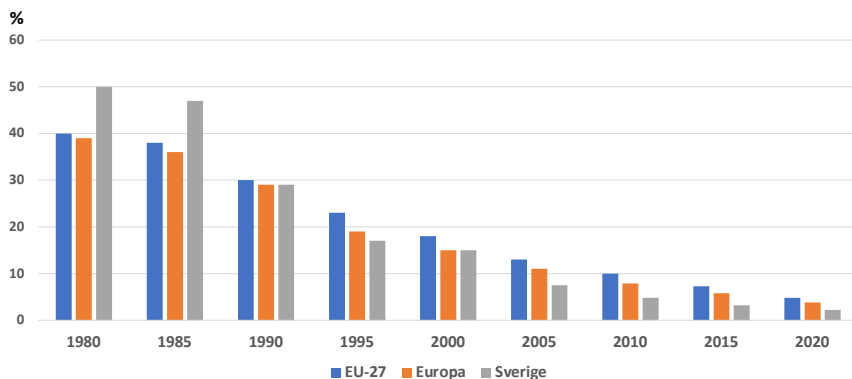
5. Framtiden

Att kunna andas ren luft är en grundläggande mänsklig rättighet, något som formellt bekräftades av FN:s generalförsamling så sent som 2021. Som framgått ovan, utsätts ändå majoriteten av Europas (och världens) befolkning, särskilt de som bor i städer, för hälsoskadliga halter av luftföroreningar, främst PM_{2,5}, NO₂ och O₃.

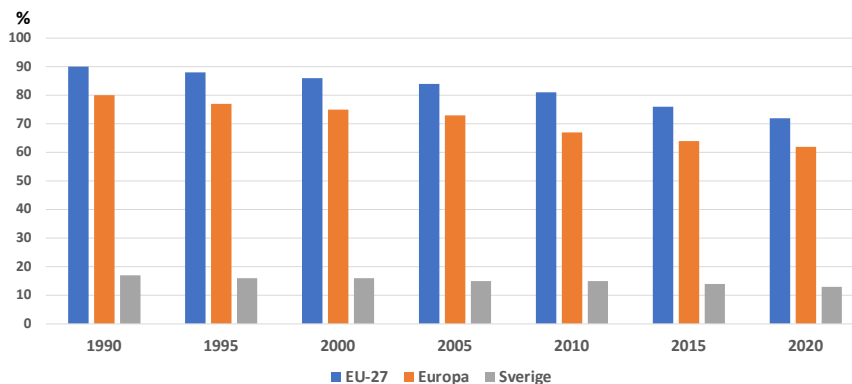
Både Luftkonventionen och EU-kommissionen har tagit fram scenarier över den förväntade utvecklingen fram till 2050, där man utgår från att alla nuvarande luftvårdslagor och -regler genomförs fullt ut, inklusive EU:s Green Deal (med bl.a. "Zero Pollution Vision" och klimatpolicyn "Fit For 55"). Trots att utsläppen av luftföroreningar förväntas fortsätta minska, visar scenarierna med skrämmande tydlighet att varken hälso- eller miljömålen kommer att nås till 2030, och högst sannolikt inte ens till 2050. Det är alltså uppenbart att mer måste göras.



Figur A. Utsläppen av luftföroreningar i EU:s 27 medlemsländer har minskat från 1990 till 2020. Medan utsläppen av svavel- och kväveoxider har reducerats med 93 respektive 63 procent, har ammoniakutsläppen minskat med endast 29 procent. (Utsläppen anges i tusen ton.)



Figur B. Staplarna anger hur stor andel (i procent) av ekosystemen i Sverige, EU och Europa som är utsatta för överbelastning av försurande luftföroreningar – det vill säga där de kritiska belastningsgränserna för försurning överskrids. Som ett resultat av de stora minskningarna av främst svavelutsläppen i Europa, har överbelastningen minskat påtagligt mellan 1980 och 2020.



Figur C. Staplarna anger hur stor andel (i procent) av ekosystemen i Sverige, EU och Europa som är utsatta för överbelastning av övergödande luftföroreningar – det vill säga där de kritiska belastningsgränserna för kväveövergödning överskrids. En viss förbättring har skett sedan 1990, men eftersom utsläppen av kväveföreningar (NH₃ och NO_x) fortfarande är alltför stora, utsätts fortfarande drygt 60 procent (mer än en miljon kvadratkilometer) av känsliga ekosystem inom EU för överbelastning.

FAKTARUTA: Hälsoeffekter av luftföroreningar i Sverige

Luftföroreningar kan orsaka hjärt- och kärlsjukdomar och andningsbesvär och har både akuta och långsiktiga hälsoeffekter. Baserat på årsmedelskoncentrationer i urban och regional bakgrund under 2019, har IVL Svenska Miljöinstitutet och Umeå universitet på uppdrag av Naturvårdsverket beräknat att luftföroreningar orsakar drygt 6700 förtida dödsfall i Sverige varje år. Varje dödsfall uppskattas motsvara en förlust av i genomsnitt tio levnadsår.

Hälsoeffekterna av förhöjda halter av kvävedioxid (NO_2) och små partiklar ($\text{PM}_{2,5}$) beräknas kosta samhället cirka 168 miljarder svenska kronor varje år. Dagar med höga halter av luftföroreningar är det fler som insjuknar och söker vård. Enbart produktivitetstförluster från sjukfrånvaron kan uppskattas orsaka samhällsekonomiska kostnader på cirka 0,02 procent av BNP i Sverige.

Resultaten visar att mer än 80 procent av den svenska befolkningen utsätts för halter av $\text{PM}_{2,5}$ som ligger över Världshälsoorganisationens (WHO) riktvärden för luft, och drygt tio procent utsätts för halter av NO_2 och PM_{10} som ligger över de rekommenderade nivåerna.

Källa: IVL Svenska Miljöinstitutet och Umeå universitet (2022). "Quantification of population exposure to NO_2 , PM_{10} and $\text{PM}_{2,5}$, and estimated health impacts 2019".

När detta skrivs pågår inom EU arbete med uppföljning, omarbetning och skärpning av flera luftföroreningsregler, bland annat direktiven om luftkvalitet, industriutsläpp, bilavgaser, och utsläppstak. I Luftkonventionen har man precis avslutat översynen av 2012 års Göteborgsprotokoll, och en revidering ska förhandlas de närmaste åren.

Luftvårdspolitiken hänger nära samman med en rad andra policy-områden, särskilt klimat, energi, transporter, industri och jordbruk.

Under 2023 ska EU:s klimatpaket "Fit for 55" slutförhandlas, och de nya klimatkraven kommer under det närmaste årtiondet att påskynda minskningen av utsläppen av växthusgaser, främst från energi-, industri- och transportsektorerna. Den krympande användningen av fossila bränslen (kol, olja, gas) medför dessutom ytterligare minskade utsläpp av luftföroreningar, främst SO_2 , NO_x och $\text{PM}_{2,5}$.

Framtidsscenarierna visar att för att klara miljömålen krävs det ytterligare åtgärder, särskilt för att minska utsläppen av:

- Ammoniak och metan från jordbrukets animalieproduktion (kött- och mjölkprodukter);
- Kväveoxider från internationell sjöfart och från vägtrafik i städer;
- Partiklar från trafikens slitage av vägytor, däck och bromsar;
- Partiklar från småskalig fastbränsleeldning (ved och kol för uppvärmning av småhus).

Trots drygt 50 års arbete för att minska luftföroreningarna, är vi alltså ännu långt ifrån att uppnå de grundläggande miljömål som antagits av både Luftkonventionen och EU, nämligen att kritisk belastning för skydd av ekosystem inte ska överskridas och människors hälsa ska skyddas från luftföroreningar.



Klimat, luftföroreningar & landskap

Klimatförändringarna pekade ofta ut som vår tids dominerande miljöfråga. Det ligger mycket i detta även om hoten mot biologisk mångfald och jordens ekosystem är en global ödesfråga av samma storleksordning. I vissa fall finns det starka kopplingar mellan klimatpåverkan och förändringar i ekosystem. Dessutom finns det viktiga samband mellan klimat och luftföroreningar. I detta kapitel skall vi fördjupa oss i hur dessa miljöproblem växelverkar med varandra.

Klimatgaser och luftföroreningar – likt och olik

Det finns många kopplingar mellan klimatfrågan och luftföroreningar. En av de viktigaste är att källorna till utsläpp av klimatpåverkande gaser och luftföroreningar i många fall – men inte alla – är de samma. Viktiga luftföroreningar som kväveoxider släpps, liksom växthusgasen koldioxid, ut när fossila bränslen förbränns, exempelvis i bilmotorer. Det finns också flera industriprocesser och olika former av energiproduktion som leder till utsläpp av både luftföroreningar och växthusgaser. Det innebär att åtgärder för att minska den ena typen av föroreningar också får gynnsamma effekter på utsläppen av den andra. När man ser till kostnaderna för att genomföra miljöförbättrande åtgärder är det viktigt att man beaktar alla vinster som kan göras. Annars ser åtgärderna mindre "lönsamma" ut än de egentligen är i förhållande till kostnaden.

Tidigare släpptes väldiga mängder försurande svavel ut tillsammans med ännu mycket större kvantiteter koldioxid i stora energianläggningar som använde kol eller olja som bränsle. Ett exempel är det oljeeldade kraftverket i Stenungsund, som togs i drift 1959 och på 1960-talet var en av Sveriges största utsläppskällor för svavel – oljan hade en mycket hög halt av svavel som släpptes ut utan rening under de första åren. År 1968 kom en lag som innebar att man inte fick använda olja med en högre halt av svavel än 2,5 % – en mycket hög halt! – men innan dess var oljans svavelhalt upp till 4 %. Idag sker bara ca 2 % av elproduktionen i Sverige med fossila bränslen och svavel kan effektivt renas från bränslet eller rökgaserna. Åtgärderna som vidtagits har alltså minskat både utsläppen av koldioxid och av luftföroreningar som svaveldioxid. Idag utgör delar av Stenungsunds kraftverk en del av reserven för elproduktion som dessutom under lång tid legat i malpåse.

Ibland är kopplingen mellan utsläpp av luftföroreningar och växthusgaser inte lika tydlig eller saknas. Avgången av ammoniak – som bidrar till flera miljöproblem inklusive övergödning och försurning – från spridning av stallgödsel och djurhållning är inte direkt kopplad till utsläpp av koldioxid, även om djurproduktionen som stallgödseln kommer från ofta använder fossila bränslen i sin verksamhet, exempelvis för transporter. Dessutom kan man få utsläpp av andra växthusgaser, som metan och lustgas, från hanteringen av stallgödsel.



Stenungsund med det gamla oljekraftverkets fyra skorstenar i bakgrunden. Kraftverket var en gång i tiden en av landets största utsläppskällor av försurande svaveldioxid.

Kortlivade klimatpåverkande luftföroreningar

I de flesta fall är växthusgaser ämnen som är långlivade i atmosfären. De finns kvar där i tiotals eller hundratals år. Metan är i detta sammanhang en ganska kortlivad växthusgas med en genomsnittlig livstid i atmosfären på ungefär tio år, medan lustgas och koldioxid stannar kvar i luften betydligt längre. Luftföroreningar oftast är mycket mer kortlivade och finns i atmosfären under några timmar eller upp till några veckor efter att de släppts ut. Deras skadlighet är i många fall kopplad till att de är reaktiva och tas upp av växter, reagerar med vävnaden i våra lungor, faller ut med nederbörd efter att ha omvandlats kemiskt i atmosfären, osv. Själva reaktiviteten gör att de blir kortlivade. Men vissa luftföroreningar är också växthusgaser eller bidrar till bildningen av klimatpåverkande partiklar. Marknära ozon är ett exempel på det förstnämnda. Ozon i luftlagren närmast jorden bildas när solljuset påverkar luftföroreningar som kväveoxider och flyktiga organiska ämnen. Ozon är en relativt betydelsefull växthusgas som samtidigt är mycket reaktiv och därigenom skadlig för hälsa, växter och material.



Sotande fackling från Borealis i Stenungsund
25/12 2018.

Partiklar – ett komplext och betydelsefullt problem

Partiklar är den typ av luftföroreningar som anses ha klart störst påverkan på människors hälsa på global nivå. Frågorna kring förekomst av partiklar i luften är ganska komplexa, bland annat på grund av att partiklarna släpps ut från en rad olika källor (som olika typer av förbränning och slitage av däck och vägbana från fordon), kan bildas i atmosfären av andra föroreningar och deponeras till växter och mark på olika sätt. Partiklar avges också till atmosfären genom naturliga processer, exempelvis uppvirvlade fina jordpartiklar och saltpartiklar som bildas i vågbrott till havs. Till detta kommer att olika partiklar är olika skadliga. Exempelvis spelar storleken på partiklarna roll – riktigt små partiklar når längre in i andningsvägarna och är därför skadligare. Vissa typer av partiklar kan transporteras långväga i atmosfären medan andra deponeras nära utsläppskällan.

Som om inte detta skulle vara nog så kan partiklar också påverka klimatet. Även i detta fall har olika typer av partiklar olika effekter. Sotpartiklar är mer eller mindre "svarta", vilket innebär att de absorberar solstrålning och förstärker därigenom växthuseffekten. Andra partiklar, exempelvis sådana som bildas av svavel och kväve i atmosfären, är snarare "vita". De reflekterar därför i stället solljus och motverkar därför uppvärmningen. Partiklar kan också ha indirekta effekter på klimatet. De vattendroppar som bildar moln uppstår kring så kallade kondensationskärnor som utgörs av partiklar. Om det blir fler partiklar i atmosfären påverkas därför bildningen av moln och även molnens egenskaper, vilket i sin tur har betydelse för molnens reflektion av solljus. Moln som består av många små droppar reflekterar mer solljus (är "vitare") än sådana som består av färre men större droppar.

Partiklar i atmosfären är alltså av mycket stor betydelse både på grund av skadeeffekter på hälsa och genom effekter på klimatet. Och som vi har sett finns det en flora av olika typer av partiklar beroende på storlek och innehåll av kemiska ämnen som påverkar vilka effekterna blir.

Värmeböljan 2018

Sommaren 2018 präglades av en ovanligt lång period av ovanligt varmt och torrt väder. Klimatmodellerna tyder på att denna typ av extremväder håller på att bli vanligare, som en följd av klimatförändringarna. Långvarig stark värme har många konsekvenser eftersom så många processer – biologiska och andra – är mycket känsliga för temperaturen. Extremt höga temperaturer, liksom väldigt låga, kan ha betydande effekter på människors hälsa. Värme och torka påverkar som alla vet växtligheten och kan vara ett problem för odling men också för andra ekosystem än jordbruksmarken. Genom näringskedjan får detta i nästa steg effekter på djur och på lång sikt kommer sammansättningen av växter och djur att förändras om klimatet förändras eftersom olika arter är olika väl anpassade till torka, höga eller låga temperaturer och andra klimatfaktorer som ändras.

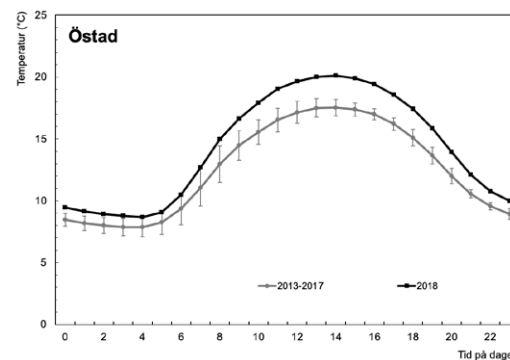
Det finns också viktiga kopplingar mellan luftföroreningar, deras omvandlingar och effekter, och klimat eller väder. De kemiska reaktioner som bildar marknära ozon underlättas av högre temperatur. Därför är det inte förvånande att högre halter av denna giftiga gas uppträder när det är varmare. Så var det också under värmeböljan 2018: halterna av marknära ozon var högre än under de föregående somrarna som varit svalare. Inte nog med det. Halterna av ozon under värmeböljan blev ännu högre än vad som kunde väntats utifrån temperaturen. Detta berodde sannolikt på torkan. När det blir mycket torrt i mark och luft minskar växternas sitt gasutbyte genom att stänga sina klyvöppningar, små porer på bladens yta som kontrollerar upptaget av koldioxid till fotosyntesen och avgivning av vattenånga genom transpiration gaser, för att inte riskera att vissna. Växternas upptag av marknära ozon genom klyvöppningarna, som kan leda till växtskador, minskar vid svår torka. Eftersom växternas upptag är en viktig process för att förbruka ozon som bildas i luften innebär detta att ozonet ansamlas i atmosfären, vilket leder till högre halter och ökad risk för hälsoeffekter.

Granbarkborren – liten skalbagge med stora konsekvenser

Ett bra exempel på hur markanvändning, ekosystem och klimat samverkar är den växande risken för angrepp av granbarkborre, en liten skalbagge som under vissa förhållanden kan uppträda i mycket stora antal och som är den viktigaste skadeinsekten som angriper gran i norra och mellersta Europa. Hur stora angreppen, som ibland är mycket omfattande och dödar många granar, blir beror



Partiklar som släpps ut i luften påverkar egenskaperna hos moln, bland annat i hur hög grad hur de reflekterar solljus, vilket i sin tur påverkar klimatet.



Under sommarhalvåret 2018 var temperaturerna betydligt högre än under den föregående femårsperioden.

GRANBARKBORREN



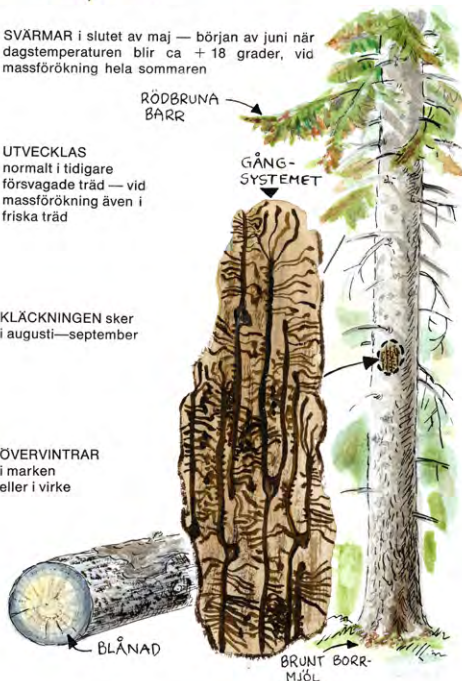
UTBREDDNING

SVÄRMAR i slutet av maj — början av juni när dagstemperaturen blir ca +18 grader, vid massförökning hela sommaren

UTVECKLAS normalt i tidigare försvagade träd — vid massförökning även i friska träd

KLÄCKNINGEN sker i augusti—september

ÖVERVINTRAR i marken eller i virke



på flera saker. Granbarkborren angriper främst försvagade träd, exempelvis sådana som är stressade av torka eller skadade av hårda vindar. Sommartorka och stormar kommer troligen att öka i takt med att klimatförändringarna fortskrider. Stigande temperaturer gynnar också granbarkborren genom att antalet generationer som denna insekt hinner med per sommarsäsong ökar.

Innan landskapet i sydvästra Sverige genom människans odling förvandlades till hedar och andra betesmarker eller åker var granen inte alls så vanlig som idag. Snarare var ek och tall mycket viktiga. När återbeskogningen för drygt hundra år sedan inleddes planterades mycket gran och så har det fortsatt. Täta plantager av gran har varit regel över stora områden. Sådana monokulturer, utan större inblandning av andra trädarter, bidrar till mer omfattande barkborreskador. En mer varierad skog med en större mångfald av trädarter minskar omfattningen på skadorna och anses också gynna granbarkborrens naturliga fiender. Ibland anges att granbarkborren skulle vara en invasiv art, men det stämmer inte. Den är ett naturligt inslag i våra skogsekosystem som har fått större betydelse genom planteringen av monokulturer av gran och dessa problem ökar med ett klimat som blir varmare, emellanåt innebär svårare sommartorka och troligen större påverkan av stormar på skogen. Även vid Gårdsjön har omfattande skador av granbarkborre skett under de senaste decennierna.



I stora delar av Sverige har man efter kalavverkning planterat gran vilket lett till ensartade skogar med bara en trädart och där alla träd är lika gamla.

Hur kommer klimatet vid Gårdsjön att utvecklas?

Det är troligt att klimatförändringarna kommer att leda till betydande förändringar i miljön kring Gårdsjön. Temperatur och nederbörd, liksom deras fördelning över året, har alltid en stor påverkan på naturen. Gränser för arters utbredning är starkt beroende av klimatet liksom konkurrensen mellan de arter som redan finns på plats, även om de val som människan gör i markanvändningen, exempel vilka träddarter man planterar, eller om man dränerar landskapet på vatten, också har stor betydelse för hur landskapet utvecklas. Det finns stora arealer i Sverige som dikats ut, exempelvis för att vinna ny åkermark eller gynna skogsbruket. Våtmarker som innehåller torv blir viktiga källor till växthusgaser när de dräneras och torven börjar bytas ner och ger ifrån sig koldioxid och andra växthusgaser. Därför anser många att man bör "återväta" landskapet genom att lägga igen diken och andra åtgärder för att restaurera våtmarkerna. En annan fördel med detta är att vattnets väg genom ekosystemen blir långsammare, vilket minskar risken för översvämningar. Det vore också gynnsamt för den biologiska mångfalden.

SMHI har utvecklat en så kallad klimatscenariotjänst. Där kan man själv gå in och se hur klimatet enligt nuvarande kunskap troligen kommer att utvecklas för olika tidshorisonter, scenarion för utsläpp av växthusgaser och årstider. I stora drag visar analyserna för den del av Bohuslän där Gårdsjön ligger att det kommer att bli varmare, men också att nederbörden kan väntas öka (se figuren på sidan 7 som visar av nederbördsökningen på västkusten). Nederbördsökningen förutspås bli större på vintern än på sommaren, vilket är av betydelse för växtligheten som främst behöver vatten under sommarhalvåret. Man måste också tänka på att ökad nederbörd inte nödvändigtvis innebär ett fuktigare klimat i form av ökad avrinning av vatten från landskapet eller bättre tillgång till vatten för växterna om temperaturen ökar. Det beror på att ett varmare klimat leder till en ökad avdunstning vilket motverkar effekten av ökad nederbörd. Här finns alltså en känslig balans mellan olika processer. Dessutom visar denna typ av genomsnittlig statistik inte på risken med ökad förekomst av extremväder. Som redan nämnts är det troligt att värmeböljor och andra extremvädertituationer kommer att öka som en följd av klimatförändringarna.





Trots mildare vintrar går det vissa år att utöva skidåkning på Gårdsjön (A). Lingon i blom, maj 2023 (B). Lägereld vid vindskyddet vid Gårdsjön (C). Gårdsjön är utgångspunkt för kanotfärder och utgör en del av ett större system av sjöar (D).



Problemet med kvicksilver i Sverige och Gårdsjön

Kvicksilver (Hg) finns naturligt i miljön genom vittring av kvicksilverhaltiga mineral och emissioner från vulkanutbrott, men utsläpp från exempelvis kolförbränning, småskalig guldutvinning, avfallsförbränning och vissa smältverk har lett till att betydligt större mängder kvicksilver cirkulerar i miljön. Vid förbränning avgår en stor andel av kvicksilvret i gasfas som har en mycket lång livstid i atmosfären jämfört med luftföroreningar som SO₂ och NO_x och därmed kan transporteras över mycket stora avstånd innan det oxideras och deponeras till växter, mark och vatten. Deponerat kvicksilvret har dessutom förmågan att återgå från ekosystemen till luft och spridas vidare, vilket innebär att de faktiska avstånden mellan utsläpp och upptag i ekosystem kan öka.

En dominerande andel av det kvicksilver som deponeras från luften i Sverige har sitt ursprung från andra länder. Huvuddelen av kvicksilvret i marken binds till organiskt material och den vertikala fördelningen av kvicksilver i marken följer ofta fördelningen av humus i markprofilen. Organiskt material i skogsmark har ackumulerat kvicksilver som tillförts genom atmosfäriskt nedfall under mycket lång tid och för många boreala avrinningsområden är den främsta kvicksilverkällan för långväga atmosfäriske transport.

Den största andelen av det kvicksilver som deponeras utgörs av oorganiskt kvicksilver och endast en liten andel utgörs av den mycket giftiga formen metylkviksilver (andelen metylkviksilver utgör ungefär 1 % av markens totala förråd av kvicksilver). Metylkviksilver kan även bildas genom mikroorganismers metylering av oorganiskt kvicksilver i mark, vatten eller sediment. Metylering gynnas av ökad nedbrytning av organiskt material i marken under syrefria eller syrefattiga förhållanden.

Metylkviksilvret är den dominerande formen av kvicksilver som ackumuleras i organismer och biomagnifieras i näringskedjan, alltså ökar koncentration i varje steg, exempelvis från bakterier till plankton, via ryggradslösa djur, till växtätande fiskar och vidare till rovfiskar. I en stor andel av svenska insjöar ligger metylkviksilverhalten i fisk som gädda och abborre över de gränsvärden för livsmedel som satts av WHO.

Hg-budget i Gårdsjön

Att göra en budget är krävande på mätningar men det skapar förståelse för de flöden och förråden som finns. Detta behövs för att kunna bedöma hur åtgärder som leder till minskande nedfall kan komma att påverka kvicksilverhalter och flöden i ekosystemen och hur inriktning på åtgärdsarbetet ska drivas.



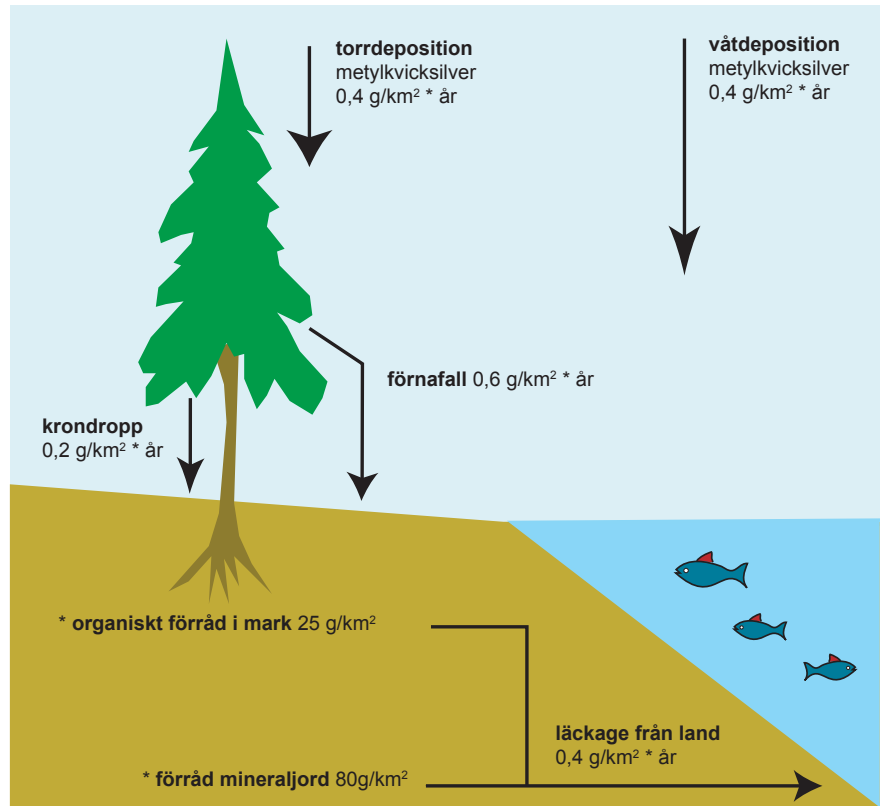
Humus i skogsmark har ackumulerat kvicksilver under mycket lång tid.

Gårdsjön var ett av första områden i världen där man genomförde mätningar på alla de viktigaste poster i Hg-budgeten för ett helt avrinningsområde – nedfall, avrinning, samt halter i skogsmark på olika djup. Vidare gjordes för den tiden unika mätningar av metylkvicksilver i samtliga flöden och förråd.

Den viktigaste slutsatsen är att förråden av kvicksilver i marken är stora och endast en liten andel tillförs årligen via nederbörd och transporteras ut med avrinning. Motsvarande bild gäller för metylkvicksilver om än med betydligt lägre halter. Utifrån perspektivet halter i fisk så är det kvicksilvret i avrinningsvattnet som belastar sjön som är det viktiga, tillsammans med nedfallet direkt på sjöytan. Trots de mycket låga halterna i avrinningen så utgör detta en stor och viktig källa till kontaminering av akvatiska ekosystem.

De stora förråden av kvicksilver i mark gör också att även relativt små förändringar av läckaget till avrinning, som kan uppkomma vid störningar orsakade av t.ex. skogsbruk, kan få stor påverkan på den totala kvicksilverbelastningen i sjön och därmed på kvicksilverhalten i fisk.

Atmosfäriskt nedfall, markförråd och läckage av metylkvicksilver från ett skogsekosystem till en sjö.



Vad orsakar utlakningen?

Under en avverkning av skogen under våren 1999 i ett av de avrinningsområden som ligger runt Gårdsjön (kallad F2 och har tidigare använts som försöksområde) transporterades timmer tvärs de övre delarna av ett annat avrinningsområde där mätningar pågick (referensområde F1) och medförde djupa hjulspår i båda avrinningsområdena. Vid den här tidpunkten analyserades både total- och metylkvicksilver i bäckvattnet från månadsvisa provtagningar och under hösten 1999 uppmättes värden upp till 2,5 nanogram per liter (ng/l) vilket är ca 50 gånger högre koncentrationer av metylkvicksilver i avrinningen än vad som uppmätts tidigare.

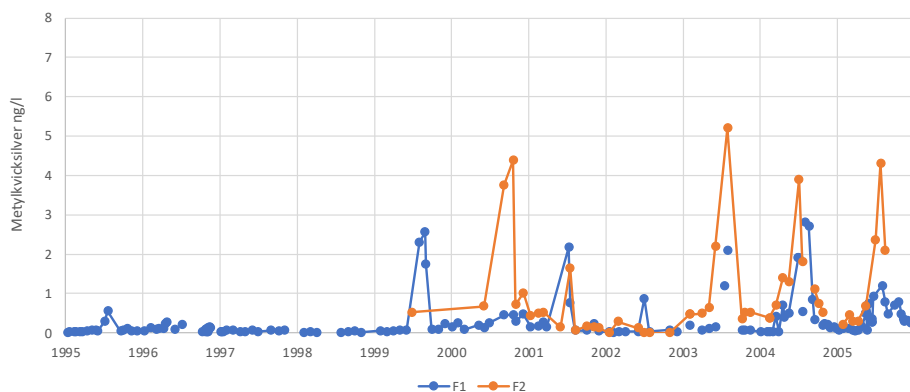
I det avverkade avrinningsområdet nådde de högsta koncentrationerna av metylkvicksilver ännu högre och under 2003 till 2005 varierade koncentrationen av metylkvicksilver mellan 0,5 och 5 ng/l, vilket är mellan 10 och 100 gånger högre än åren före 1999.

De mekaniska skadorna av timmertransporten orsakade omfattande förändringar av vattenflöden och markens organiska material. Detta samverkade med ökad vattenlöslighet av metylkvicksilver och medförde en stor, flerårig uttransport av metylkvicksilver med avrinnande vatten. En ökad uttransport från skogsmark av metylkvicksilver till sjöar medför ett ökat upptag i fisk. Flera studier har visat att bioackumuleringen av metylkvicksilver i hela näringskedjan ökade i sjöar nedströms avverkade skogsområden.

Sverige har sedan länge minskat utsläppen av kvicksilver till luft och vatten och även inom Europa i övrigt och Nordamerika har utsläppen minskat. Globalt är dock utsläppen relativt konstanta då ökningarna skett i Asien och från småskalig gulddutvinning i många regioner. Metylkvicksilver i fisk från skogssjöar har emellertid inte minskat på motsvarande sätt som de svenska utsläppen. En viktig orsak till detta kan vara det moderna skogsbruket där tunga traktorer används för timmertransport såväl som vid avverkning av skogen. Detta påverkar humuslagret i marken vilket resulterar i ökad uttransport av metylkvicksilver från det organiska materialet. Problemen med höga halter metylkvicksilver i fisk i områden med industrialiserat skogsbruk kan, tillsammans med en fortsatt långväga transport och nedfall, vara en orsak till den storskaliga utbredningen av höga halter metylkvicksilver i fisk i Sverige.

FAKTARUTA: Analysutveckling

- Hg förekommer i naturliga vatten i mycket låga koncentrationer – oftast kring någon eller några nanogram per liter motsvarar gram Hg per 1 miljon kubikmeter vatten. Metylkvicksilverandelen är ca 1–5 % av detta.
- Metoder för att provta vatten och analysera dessa låga halter är en utmaning och robusta metoder blev tillgängliga först på 1980-talet.
- Genom biomagnifiering är halter i fisk betydligt högre (storleksordning ett milligram per kilo) och därmed betydligt enklare att analysera.



Metylkvicksilver ökade i avrinningen från område F1 och F2 efter timmertransport och avverkning.

Tips på hemsidor

www.artfakta.se
www.artportalen.se
www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution (Europeiska miljöbyrån)
www.airclim.org (Luftförorenings- och klimatsekretariatet)
<http://www.gardsjon.org> (Gårdsjö-stiftelsen)
www.naturvardsverket.se (Naturvårdsverket)
www.unece.org/env/lrtap/ (Konventionen om gränsöverskridande luftföroreningar)
<https://environment.ec.europa.eu/topics/>

Gårdsjöstiftelsen

Gårdsjöstiftelsen är en ideell stiftelse som grundades 1991 av Hensbackastiftelsen, IVL Svenska Miljöinstitutet AB och Stenungsunds kommun. I styrelsen finns representanter från IVL, Hensbackastiftelsen, Stenungsunds kommun och enskilda personer med engagemang i miljöfrågor.

Stiftelsens roll

Gårdsjöstiftelsens syfte är att, med forskningen i och kring Gårdsjön som utgångspunkt, informera om luftföroreningar och deras skadeeffekter på vatten, skog och mark. Målgrupper är beslutsfattare inom privat och offentlig verksamhet, politiker, miljöexperter, forskare, skolor, universitetsstudenter och allmänhet, både nationellt och internationellt.



**gårdsjö
stiftelsen**

Läs mer om luftföroreningar, försurning och klimat

- Anderson, F. & B. Olsson 1985. *Lake Gårdsjön. An acid forest lake and its catchment.* – Ecological Bulletins 37. Stockholm. 336 sidor.
- ArtDatabanken 2020. Rödlistade arter i Sverige 2020. – SLU, ArtDatabanken, Uppsala.
- Bernes, C. (red.) 1991. *Försurning och kalkning av svenska vatten.* – Monitor 12. Naturvårdsverket, Stockholm. 144 sidor.
- Bernes, C. (red.) 2001. *Läker tiden alla sår?* – Naturvårdsverket Monitor 17, Stockholm.
- Bertills, U. & T. Näsholm (red.) 2000. *Effekter av kvävenedfall på skogsekosystem.* – Naturvårdsverket Rapport 5066. Stockholm. 154 sidor.
- Dickson, W. 1988. *Liming of Lake Gårdsjön.* – Swedish Environmental Protection Agency. Report 3426. Solna. 327 sidor.
- Elvingson, P. 2001. *Luften och miljön.* – Avdeln. för tillämpad miljövetenskap, Göteborgs universitet, Göteborg. 199 sidor.
- Havs- och vattenmyndigheten 2022. *Ingen övergödning. Fördjupad utvärdering av miljömålen 2023.* – Havs- och vattenmyndigheten rapport 2022:16, Stockholm.
- Havs- och vattenmyndigheten 2020. *Målvattendragundersökningen 2010 - 2016. Bedömning av surhet och försurning i kalkade vattendrag.* – Havs- och vattenmyndigheten. Rapport 2020:29, Göteborg.
- Havs- och vattenmyndigheten 2021. *Kalkningsåret 2021. En redovisning av nyckeltal.* – Havs- och vattenmyndigheten. Rapport 2020:29, Stockholm.
- Hultberg, H. & R. Skeffington 1998. *Experimental Reversal of Acid Rain Effects. The Gårdsjön Roof Project (1998).* – Wiley & Sons. 466 sidor.
- Naturvårdsverket 2023. *Fördjupad utvärdering av Sveriges miljömål 2023.* – Naturvårdsverket Rapport 7088, Stockholm.
- Naturvårdsverket 2023. *Frisk luft. Fördjupad utvärdering av miljömålen 2023.* – Naturvårdsverket Rapport 7067, Stockholm.
- Naturvårdsverket 2023. *Bara naturlig försurning. Fördjupad utvärdering av miljömålen 2023.* – Naturvårdsverket Rapport 7069, Stockholm.
- Naturvårdsverket 2023. *Begränsad klimatpåverkan. Fördjupad utvärdering av miljömålen 2023.* – Naturvårdsverket Rapport 7068, Stockholm.
- Naturvårdsverket 2023. *Luft & miljö 2023 - Partiklar.* – Naturvårdsverket (mars 2023).
- Pleijel, H. (red.) 1999. *Marknära ozon – ett hot mot växterna.* – Naturvårdsverket Rapport 4969, Stockholm. 112 sidor.
- Statens offentliga utredningar 2000. *Framtidens miljö – allas vårt ansvar.* – SOU 2000:52. Fritzes offentliga publikationer, Stockholm. 1339 sidor.
- Sveriges riksdag 2000. *Svenska miljömål – delmål och åtgärdsstrategier* Proposition 2000/01:130. – Riksdagens tryckeriexpedition, Stockholm. 251 sidor.
- Warfinge, P. & U. Bertills (red.) 2000. *Naturens återhämtning från försurning.* – Naturvårdsverket Rapport 5028, Stockholm. 96 sidor.



Jordklotet är mer än fyra miljarder år gammalt. Berggrunden kring Gårdsjön, som består av granit och gnejs, är 1,7 miljarder år. Tanken svindlar! Istiden är inte mer än 12000 år avlägsen. Under en försvinnande liten del av jordens historia, mindre än 100 år, har de ekologiska systemen, grundvattnet och sjöarna drastiskt bytt skepnad under trycket från olika föroreningar. Jordtäcket i skogen kring Gårdsjön är mycket ungt i ett geologiskt perspektiv. Det är också mycket tunt och har svag förmåga att stå emot försurning. Därför har 1900-talets enorma utsläpp av luftföroreningar med svavel haft så negativa effekter på mark, vatten och skogsekosystem runt Gårdsjön. Det gäller också tusentals liknande sjöar i Sverige och i många andra länder på norra halvklotet.

Sedan 1980-talet har de försurande luftföroreningarna i Europa minskat och en återhämtning pågår i mark, vattendrag och sjöar över stora delar av de tidigare försurade områdena i Skandinavien. Trots alla goda nyheter är faran inte över. Fortfarande är nedfallet av kväve stort, liksom halterna av marknära ozon. I den här skriften ges en inblick i några av de allvarligaste miljöproblemen som rör sjöar och skogsekosystem, jämte resultat av 50 års forskning kring luftföroreningars effekter på ekosystemen runt Gårdsjön.

Välkomna till Gårdsjön
önskar Gårdsjöstiftelsen



**gårdsjö
stiftelsen**

